

EL
TELESCOPIO
de
REFLEXIÓN



NEWTON
ENTRE LUCES
Y CRISTALES

EL TELESCOPIO DE REFLEXIÓN
NEWTON ENTRE LUCES Y CRISTALES

© DE LA INTRODUCCIÓN Y LAS NOTAS: ANTONIO LAFUENTE, NURIA VALVERDE,
JUAN PIMENTEL © DE ESTA EDICIÓN: CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS, 2004 © DE LA TRADUCCIÓN: ANTONIO LAFUENTE, NURIA
VALVERDE, JEREMY ROGERS © DE LOS TEXTOS FACSIMILARES DE NEWTON: THE
NEWTON PROJECT <WWW.NEWTONPROJECT.IC.AC.UK> DISEÑO Y MAQUETACIÓN:
DUPLEX IMPRESIÓN: GRÁFICAS ALMEIDA encuadernación: xxxxxxxx xxxxxx
DÉPÓSITO LEGAL: xxxxxxxxxxxxxx

EL
TELESCOPIO
de
REFLEXIÓN

NEWTON ENTRE LUCES
Y CRISTALES



ANTONIO LAFUENTE
NURIA VALVERDE
JUAN PIMENTEL

Consejo Superior de Investigaciones Científicas



A partir de su teoría de la luz y de sus conocimientos químicos, Newton construyó con sus propias manos un telescopio de reflexión. Se lograba así por primera vez disponer de un instrumento que evitase el problema de la aberración cromática y que ofreciese imágenes más nítidas en las observaciones. Su segundo telescopio lo envió a la Royal Society, abriéndole las puertas de tan prestigiosa institución.

ÍNDICE

(9)

Miradas de Newton

A. LAFUENTE, N. VALVERDE, J. PIMENTEL

(49)

*Nueva teoría de la luz
y los colores*

(87)

El Telescopio catadióptrico

M I R A D A S
D E N E W T O N

A. Lafuente, N. Valverde, J. Pimentel



A lo largo de las muchas ediciones de la *Óptica* que circularon en el siglo XVIII, se fue forjando la imagen de un Newton genial, el gran autor que conseguiría reducir la óptica a la geometría. Legión de seguidores vieron en su obra una agenda para las investigaciones futuras, y se encargaron de que un vasto público comprobase en las demostraciones experimentales lo que Newton había demostrado matemáticamente.

Saber de Newton se ha convertido en una empresa titánica. La más sencilla aproximación a la *newtoniana* abruma, tanto por la calidad como por la cantidad de las publicaciones. El género no da respiro ni conoce tregua. Desde el siglo XVIII pocos lograron evitar su cita en la bibliografía, ya fuera para arrimarse al sol más resplandeciente o para sustituir el «newtoncentrismo» por cualquier otro «heliocentrismo». A menudo se osciló entre extremos sorprendentes. Así, mientras William Blake quiso sepultarlo por haber entronizado la Razón, lord Keynes lo resucitó como el último de los magos caldeos¹. Ya durante la Ilustración se conocieron los más variados proyectos que reclamaban una identidad newtoniana, desde la química o la fisiología, hasta la moral, la política y las pasiones. Como un artículo de fe se extendió la creencia: un saber accedía al estatuto de cien-

¹ Lord Keynes, «Newton the Man», en *Newton Tercentenary Celebrations*, Cambridge, Royal Society, 1947, pp. 27-43.

tífico sólo si lograba expresarse según el modelo introducido por los *Principia*.

En el siglo XIX nadie pareció temer la exageración, y aun cuando las obras de Lagrange en mecánica o de Fourier en termodinámica eran conocidas, nadie quiso introducir matices. Todos apostaron por abundar en las simplificaciones que requieren los mitos para alcanzar el rango de fundacionales. *Simplex est sigillum veri*. Hablar de Newton era moda y también signo. Y en cada paso hacia la idealización, la persona se alejaba en relación inversa a lo que se aproximaba el personaje. Y así se fue esfumando el hombre: la abstracción mejoró la portabilidad de la imagen, cuanto mejor circulaba mayor era su credibilidad. La carne se hizo mármol en Westminster. La piedra rodó como plegaria en las prensas. Es el mismo movimiento de rarefacción que sucesivamente transforma una vida en obituario, esfinge, estatua y mito.

No sólo fue así en Inglaterra, pues muchos historiadores han querido ver el tránsito de un país hacia la modernidad como un proceso de paulatino acercamiento a la ciencia moderna, es decir, a Newton². Y es que sobre todas las cosas, el newtonismo ha sido una gran ideología y también una poderosa metáfora. Pero como tampoco está muy claro que todas las retóricas, laudatorias o no, desemboquen en el mismo producto,

² Esta perspectiva, sin embargo, no es reciente, sino que viene acreditada por una larga tradición que en el mundo hispánico, por ejemplo, tiene sus exponentes en los escritos de Feijoo (España), Gamarra (México), Mutis (Colombia), Espejo (Ecuador) o Malaspina (Italia).

quizás convenga hablar de la pluralidad de imágenes newtonianas. De cómo y cuándo comenzó este tráfico incesante de figuras y refracciones. Newtonianas todas.

NEWTON Y EL NEWTONISMO

Comencemos por las transformaciones que el propio Newton fue dando a sus palabras para soslayar la vigilancia de sus críticos, un público al que, en virtud de su acusado carácter paranoico³, trató como enemigos. Digamos algo sobre el contexto político en que fue acogida su obra, marcado por profundas tensiones sociales y religiosas. Bastan algunos datos, como la alarma que creó en Inglaterra la posibilidad de que un católico sucediera en el trono a Carlos II y los desesperados intentos de lord Shaftesbury para evitarlo y organizar un amplio movimiento de oposición.

El último tercio del Seiscientos fue una época atravesada por movimientos cismáticos, igualitaristas, republicanos y, como había ocurrido treinta años antes, caldo apropiado para el cultivo de sectas herméticas, alquímicas y en general ocultistas. En pocas palabras, volvió a campar el *enthusiasm*, un término polisémico con el que vino a calificarse a quienes justificaban la rebelión contra el orden aristocrático, incluido el

³ Frank E. Manuel, *A portrait of Isaac Newton*, Cambridge, Ma., Harvard University Press, 1968.

monarca. Exageraban el testimonio de los sentidos, consideraban el mundo como un ente por sí mismo activo, se comunicaban con él sin necesidad de pontífices ni reyes. Cercanos al panteísmo y al materialismo, predicaban un orden social y natural rápidamente identificado como subversivo entre los partidarios de la filosofía mecanicista, entre los que figuraban gente tan reputada como Descartes, Gassendi o Hobbes. Tras la Restauración (1660) el mecanicismo se introdujo con *forceps* en las universidades del reino. Y así, contra la llamada herencia renacentista y las tradiciones ocultistas, el mundo hubo de hacerse inodoro, incoloro e insípido: inerte como una máquina, equilibrado como un buen gobierno.

Las llamadas a la moderación contra el (des)calificado radicalismo filosófico fueron ganando audiencia y la propia Royal Society tomó el liderazgo. Thomas Sprat, cuando escribió la historia de la institución en clave apologética, abrazó una retórica del justo medio que animaba a los *fellows* a buscar entre el lenguaje y la realidad una relación de uno a uno, mediada por los instrumentos y ajena al lenguaje figurativo y visionario. Reproducir algún texto de Newton sobre alquimia, el profeta Daniel o el templo de Salomón, serviría para confirmar la enorme influencia que recibió del hermetismo, así como la autocensura que se impuso. Quienes mejor conocen su obra han mostrado hasta qué punto se encargó de traducir a lenguaje mecánico gran parte de lo que había pensado (¡y experimentado!) dentro de la tradición y las prácticas her-

méticas⁴. Nunca llegó a pensar el mundo en términos tan estáticos como un Descartes, pues sus publicaciones están salpicadas de frases que inducían a creer que, mientras el universo macrocósmico podía inscribirse dentro de la filosofía mecanicista, en el microcosmos, por el contrario, aparecían fenómenos —digestión, fermentación, putrefacción, crecimiento, calor o fluorescencia— que requerían mirar, aunque fuera de reojo, hacia las tradiciones panvitalistas.

La alquimia no era una actividad residual en los círculos ilustrados ingleses de finales del siglo XVII, como lo prueban varios hechos. Empecemos por los números, que siguen conservando esa magia de otorgar verosimilitud a las palabras; en total, Newton escribió más de 1.200.000 palabras sobre alquimia, acumuló manuscritos sobre estas cuestiones durante 30 años y realizó experimentos desde 1673 por más de dos décadas. De alguno de los manuscritos que escribió se conservan hasta cuatro borradores y en su *Index Chemicus* incluyó más de 5.000 referencias a unas 150 obras alquímicas diferentes. De su papeleteo de libros y manuscritos, así como de las actividades de laboratorio, estuvieron informados Locke o Boyle, y está probado su magisterio en los círculos alquímicos. Más aún, en 1696 y sólo dos semanas antes de ser designado supervisor del *Mint*, recibió la visita de algunos colegas alquimistas.

⁴ David Kurbin, «Newton's inside out! Magic, class struggle, and the rise of mechanism in the West», en Harry Woolf (ed.), *The analytic Spirit. Essays in the History of Science in Honor of Henry Guerlac*, Ithaca, Cornell University Press, 1981, pp. 96-121.

tas que fueron a consultarle sobre su trabajo, contactos que mantuvo siendo ya presidente de la citada Casa de la Moneda inglesa. En todo caso, impresiona saber que más de la mitad de sus textos alquímicos fueron escritos después de la publicación de los *Principia*.⁵

Su interés por la teología, la historia de la Iglesia y los textos sagrados está igualmente probado⁶. Como la mayoría de sus contemporáneos, Newton estaba convencido de la existencia de una doble revelación. La primera estaba contenida en los textos bíblicos, y la segunda encerrada en la Creación. Con su trabajo científico se consagraba al desvelamiento de las regularidades con que Dios, al imponer la armonía cósmica, revelaba a los humanos leyes de las que extraer claves y normas para una conducta moralmente aceptable. Lejos de aceptar al Dios de Descartes, un Ser frío e indiferente ante un mundo al que de una vez

⁵ Cf., Richard S. Westfall, «Newton y la alquimia», en Brian Vickers, (ed.), *Mentalidades ocultas y científicas en el Renacimiento*, Madrid, Alianza Editorial, pp. 255-279. En este punto es inevitable citar los estudios de B. J. T. Dobbs, *The foundations of Newton's alchemy: the hunting of the greene lyon*, Cambridge, 1974; y también Karin Figala, «Newton as alchemist», *History of science*, 15, 102-37, 1977. Brian Vickers, «Analogía versus identidad: el rechazo del simbolismo oculto (1580-1680)», en B. Vickers, ed., *Mentalidades...*, op. cit., pp. 63-144. También, Ron Millen, «The manifestation of occult qualities in the scientific revolution», en Margaret J. Osler & Paul Lawrence Farber, (eds.), *Religion, science, and worldview. Essays in honor of Richard S. Westfall*, Cambridge University Press, 1985, pp. 185-216.

⁶ Sus biógrafos datan a finales de 1676, tiempo que Westfall llamó los *años de silencio*, el comienzo de su interés por la historia de la Iglesia especialmente, la coyuntura en la que Anastasio propuso la tesis de la trinidad y el desarrollo del monasticismo, allá por los siglos IV y V, así como por la relación entre revelación y tradición talmúdica. Posteriormente, hacia mediados de la

había impuesto el movimiento y sus leyes, Newton apostó por la naturaleza providencial del orden y la constante intervención divina para su mantenimiento. El Dios de Descartes era una pieza metafísica obligado a mantener sus propias leyes, sólo necesario el día en que puso en marcha la maquinaria del Universo. El Dios de Newton no era un *landlord* abstinentes. Debía vigilar que todo funcionara. Un artesano, como señaló irónicamente Koyré, que no podía separarse de su reloj, pues debía ajustar su hora, corregirlo sin cesar. Los milagros, por ejemplo, acreditaban esta tesis.

Pero Newton temía problemas (su miedo a las controversias fue proverbial) y por ello corrigió la primera edición de los *Principia*, en donde hablaba de la transmutación de los elementos. Modificó así su teoría de una materia proteica sometida a interminables cambios por otra que ya incluía cualidades esenciales

década de los ochenta, sus estudios se orientan hacia el análisis de las profecías y las razones para la apostasía. Algunas de sus conclusiones son conocidas; por ejemplo su rechazo total del trinitarismo, considerado como una de las más graves perversiones de la Cristiandad y doctrina que, elevando a Jesús por encima de la condición de profeta, había devaluado los estudios veterotestamentarios. En efecto era Newton partidario del Dios de Abraham y, por tanto, de un Pantocrator, Gobernador todopoderoso, severo y justiciero, más implacable que paternal con sus criaturas. Como hermeneuta fue más fundamentalista que contextual, y de ahí sus dificultades iniciales con la Iglesia anglicana o su primera inclusión entre las filas del radicalismo religioso que atezó a Inglaterra en el segundo tercio del Seiscientos. Ver, Richard S. Westfall, *Never at Rest. A Biography of Isaac Newton*, Cambridge University Press, 1980, pp. 335 ss. En este sentido, al CSIC le cabe el mérito de haber volcado por vez primera en una lengua moderna uno de los textos centrales en dicho contexto: Isaac Newton, *El Templo de Salomón*, Ciriaca Morano (ed.), Madrid: Debate/CSIC, 1996.

(extensión, inercia e impenetrabilidad)⁷. Es decir, desarrolló la noción de cualidades primarias de la materia que estaba en la base de la teoría psicológica de los fenómenos incorporada por John Locke en el *Essay concerning Human Understanding* (1689). Tal cambio se fue acentuando con el tiempo. Newton no desperdició oportunidad para introducir conceptos que estabilizaran el mundo en detrimento de su primera inclinación a subrayar la ilimitada transformabilidad de la naturaleza. Sus discípulos le ayudaron a culminar esta conversión intelectual. Samuel Clarke, por ejemplo, siendo su portavoz a través de las *Boyle's lectures*, ya anunció en 1704 que las doctrinas de Toland, Hobbes y Spinoza eran contrarias a la religión y una amenaza para la Iglesia de Inglaterra.

ENTRE LO DIVINO Y LO MUNDANO

No estamos insinuando sólo que las ideas de Newton fueron modeladas por consideraciones sociales, políticas y económicas, sino que, como ha insistido Margaret J. Jacob, llegaron a convertirse en la ideología

⁷ Simon Schaffer ha probado que la teoría de la materia newtoniana fue la que dio cohesión a la multiforme cantidad de intereses presentes en los escritos de Newton; ver su artículo «Natural Philosophy» en George Rousseau & Roy Porter, (eds.), *The Ferment of Knowledge. Studies in the Historiography of Eighteenth-Century Science*, Cambridge University Press, 1980, pp. 55-92.

dominante que el grupo en el poder de los *latitudinarios* impuso como norma de buen gusto: «La contribución más importante de los filósofos naturales de la Restauración —hombres como Wilkins, Boyle y Barrow— fue la articulación de un tipo de filosofía mecánica que requería la participación activa de Dios... El orden y la armonía tan evidentes para los filósofos de la Restauración existían únicamente por ser la Providencia quien supervisaba todas y cada una de las operaciones de la naturaleza. Para ello se servía de leyes que expresaban su voluntad y que a la ciencia le correspondía descubrir y mostrar a fin de explicar al hombre las operaciones de la providencia en su Creador»⁸. Así entendida, la ciencia fue bálsamo que restañó las heridas de la guerra civil, legitimando a la Iglesia y al estado de la Restauración monárquica y excluyendo del espacio público a librepensadores, fanáticos, ateos y materialistas de toda condición. La filosofía newtoniana se convirtió en el mejor aliado del sector latitudinario de la iglesia anglicana para el mantenimiento del orden y la estabilidad social⁹.

Sin embargo, el frente religioso y político no fue el más decisivo para la implantación del newtonismo como divisa de la filosofía experimental. Por toda Inglaterra primero y más tarde en los Países Bajos iban a

⁸ Margaret C. Jacob, *The Newtonians and the English Revolution 1689-1720*, Ithaca: Cornell University Press, 1976, p. 23. Ver también Betty J. T. Dobbs & Margaret C. Jacob, *Newton and the Culture of Newtonianism*, New Jersey: Humanities Press, 1995.

⁹ Margaret C. Jacob, *The Cultural Meaning of the Scientific Revolution*, New York: McGraw-Hill, 1988.

proliferar las sesiones públicas de demostraciones experimentales. Ambos factores, idoneidad moral y replicabilidad pública, contribuyeron a la creación de una especie de *encanto órfico* que acortó la enorme distancia que existía entre la cultura de élite y la popular¹⁰. En efecto, muchos de los primeros newtonianos entendieron que acrecentar su legado equivalía a explorar los *principios activos* que se revelaban a través de las fuerzas que operan en la naturaleza conforme al programa experimental diseñado en la *Óptica*. La novedad vino del uso intensivo que se hizo de un tipo de conferencia pública que incluía demostraciones prácticas¹¹.

No se conoce con precisión el origen de un fenómeno tan característico de la ciencia inglesa de principios del siglo XVIII, si bien se sabe que entre 1698 y 1707 se hicieron famosas las que impartió John Harris en la *Marine Coffee House*, financiadas por el cervecero de Southwark, Charles Cox. Hablamos de una actividad que logró tales cuotas de popularidad que han permitido a Larry Stewart decir que «...los *Whig coffee-houses* constituyeron la matriz de la persuasión newtoniana»¹². Tenemos muchos ejemplos de cómo la difusión del newtonismo adquirió los perfiles de una cruzada de popularización. Más aún, el arraigo de es-

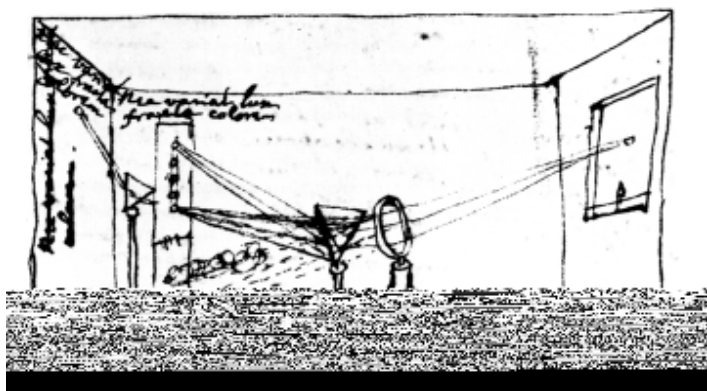
¹⁰ James R. Jacob, «*By an Orphean Charm: Science and the Two Cultures in Seventeenth-Century England*», en Phyllis Mack & Margaret C. Jacob, (eds.), *Politics and Culture in Early Modern Europe: Essays in Honor of H.G. Koenigsberger*, Cambridge University Press, 1986.

¹¹ Larry Stewart, *The Rise of Public Science. Rhetoric, Technology, and Natural Philosophy in Newtonian Britain, 1660-1750*, Cambridge University Press, 1992.

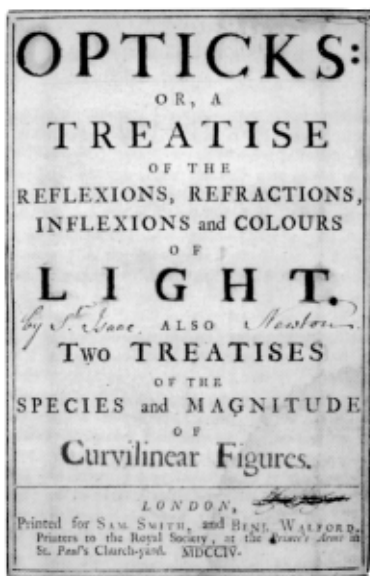
¹² *Ibidem*, p. 146.



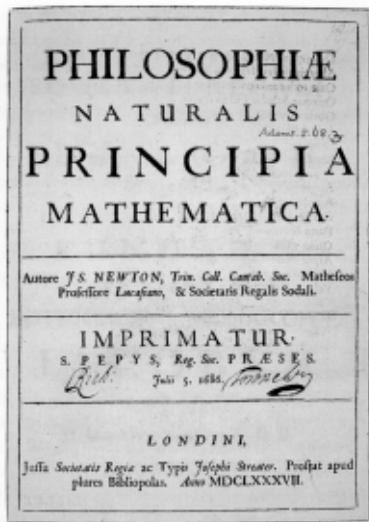
Las reuniones científicas de la Royal Society eran un foco de legitimidad insoslayable para quien tuviera que aportar alguna novedad en el campo de la ciencia. Newton encontró en ella apoyos, pero también resistencias, especialmente la de Robert Hooke. Una vez establecido en Londres, pudo asistir con regularidad a esas reuniones. Pero sólo tras la desaparición de Hooke, y habiéndose retirado Lord Somers, aceptó la presidencia de la institución, formando un compacto grupo de lealtades.



El aire fortuito del *experimentum crucis* es puramente retórico. La expectativa de Newton de que la imagen proyectada fuese circular, en vez de alargada, era producto de una ingente cantidad de información geométrica. Es pues un experimento diseñado, que requiere situar el prisma en un ángulo preciso. La falta de un diagrama explicativo en la carta enviada a la Royal Society dificultó que los lectores lo comprendieran bien.



Primera edición de la *Óptica* (1704), un tratado escrito ya en inglés y no en latín. En lugar de exponer sus ideas a través del método matemático y axiomático por el que ya era reconocido como el mayor geómetra de su tiempo, Newton levantó un relato experimental en el que detallaba sus proceder. Además de contener el trabajo sobre el que apoyaba su teoría de la luz y los colores, incluyó al final las famosas *queries*, la serie de preguntas e interrogaciones en torno a un amplio abanico de fenómenos físicos (la electricidad, el calor) con las que extender la filosofía experimental en otras direcciones.



Primera edición de los *Principia* (1687), sin duda, uno de los textos capitales de toda la cultura occidental. Su origen está en las discusiones que mantuvieron Christopher Wren, Robert Hooke y Edmund Halley sobre cómo demostrar la tercera ley de Kepler. Fue Halley quien incorporó a Newton al debate y quien, tras recibir desde Cambridge una explicación de nueve páginas titulada *De Motu Corporum*, le animó a desarrollar el trabajo. Pero dos años después la *Royal Society* acababa de publicar una lujosa *Historia de los peces*, por lo que el gran astrónomo hubo de costear su edición.

ta especie de espíritu democratizador de la cultura, con precedentes indiscutibles en los movimientos radical-es igualitaristas de épocas anteriores, fue tan marcado que Benjamin Martin, uno de los conferenciantes itinerantes más afamados del momento, llegó a criticar a Pemberton y su *View of Sir Isaac Newton's Philosophy* por considerarla una obra demasiado cara y excesivamente complicada. Para 1720 ya se habían conquistado para la ciencia nuevos espacios de legitimación con nuevas audiencias¹³. Más aún, se había probado que el

¹³ Los cursos de Harris, tras su interrupción en 1707, fueron continuados por James Hodson y Francis Hauksbee, y más tarde por Humphrey Ditton. Hubo alternativas al *Marin Coffee House*, como las sesiones impartidas por John Keill, discípulo de David Gregory, en *Hart Hall*, Oxford, en 1704 o 1705. Jean Téophile Desaguliers, que fue alumno de Keill, le sucedió a partir de 1710. En Cambridge, Roger Cotes y William Whiston iniciaron en 1707 sus cursos hasta la expulsión de éste de la universidad por sus ideas heréticas. Le sustituyó Roger Smith, mientras que Whiston se desplazó a Londres para asociarse con Hauksbee e impartir una nueva serie de conferencias populares, en competición con Desaguliers que les adelantaba en prestigio. En 1720 se incrementó la oferta en la capital con los cursos regulares que Thomas Watts, Benjamin Worster y, más tarde, James Stirling y William Vrean, impartieron en una academia situada en *Little Tower Street*. Se hicieron tan prestigiosas que pronto su fama cruzó el Canal, y ya en 1720 encontraremos al holandés Willen J. s'Gravesande, discípulo de Desaguliers, escribir en el prefacio de su muy conocido manual newtoniano *Physices elementa mathematica, experimentis confirmata. Sive introductio ad philosophiam Newtonianam*, lo que sigue: «Dado el carácter de todas las demostraciones matemáticas, no me cabe la menor duda de que resultarán más fáciles si las conclusiones se establecieran ante nuestros ojos por procedimientos experimentales, siguiendo el ejemplo de los ingleses, cuya forma de enseñar la filosofía natural es la que me sugirió el método que he seguido en esta obra». No sólo se loaba una manera de entender la ciencia, sino también un estilo de enseñarla, un nuevo modelo de educación científica basado en la demostración experimental.

lugar donde se legitimaba el discurso era crucial, tanto para la creación de nuevos públicos como para la aquilatación de un *standard* newtoniano que cristalizó en dos obras, los *Principia* (1687) y la *Óptica* (1704). El primero implicaba un programa teórico de trabajo en mecánica y astronomía, el segundo, por el contrario, se conformó como una guía de usos y protocolos para la práctica de la filosofía experimental¹⁴.

LA VIDA EXPERIMENTAL Y SU HISTORIA

La ciencia siempre se ha caracterizado por vertebrar un tráfico ingente de datos, recursos, objetos y personas en el seno de estructuras severamente jerarquizadas y polarizadas hacia unos cuantos centros hegemónicos. Sobran ejemplos antiguos y modernos¹⁵. Sin

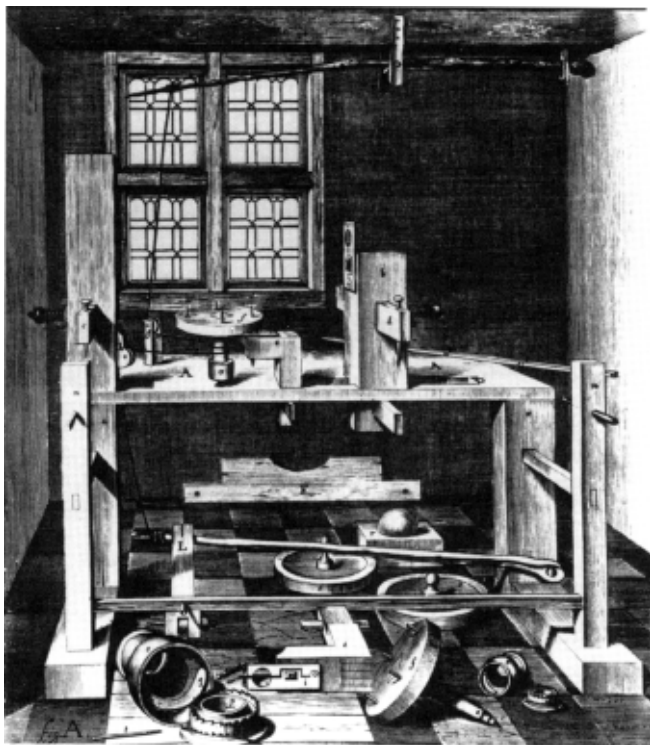
¹⁴ Simon Schaffer, «Newtonianism», en *The Companion to the History of Science*, Londres: Routledge, 1993, pp. 610-626.

¹⁵ Desde la leyenda de los espejos ardientes de Arquímedes, los ejemplos procedentes de etapas más tempranas abundan. Los cuadernos de Leonardo están repletos de notas sobre armas y fortificaciones. El propio Galileo, en carta a su patrón el dogo de Venecia Leonardo Donato, incluía entre las ventajas de su telescopio, además de las asociadas al progreso de la astronomía, aquéllas que lo convertían en un instrumento insustituible para la observación desde segura distancia de las defensas o movimientos de las tropas enemigas. En el siglo XVIII Maupertuis, tras ser nombrado por Federico II presidente de la Academia de Ciencias de Berlín, presentó en 1752 un programa detallado de actuaciones en el que reconocía la existencia de actividades científicas que «tienen necesidad del poder de los soberanos; se trata de todas las que exigen grandes gastos que no pueden realizar los particulares o que requieren experiencias que, en condicio-

embargo, las imágenes persisten empeñándose en mostrar que la esfera del conocimiento está separada de su entorno. No importa si están involucrados príncipes, si los investigadores mantienen relaciones estrechas con industriales, si el número de técnicos en un experimento es inmenso o si los instrumentos son caros y complejos de manejar. Así las cosas, la imagen que se nos ofreció de la ciencia fue un hermoso cuadro, una *Big Picture*¹⁶ construida a partir de una gran narrativa: la Revolución Científica, una epopeya cuyos momentos dramáticos principales eran la revolución copernicana, la revolución galileana y la revolución newtoniana. También representaban su papel los Harvey y los Kepler. E incluso, algo más desenfocados, los Linneos o los Lavoisieres. El relato despertaba instintos de rebeldía frente a la teología y la tradición. Y fuera de este escenario, poco o quizás nada. Porque al hablar de Newton, el «amado de las musas» cuya feliz síntesis de la tradición matemática y la tradición experimental culminaba el nudo del gran relato ¿quién podría distraerse con sus cargos públicos, sus relaciones con los artesanos, con los problemas de replicabilidad

nes normales, no serían practicables». Aquí Maupertuis se refería a las expediciones científicas o a la experimentación de remedios terapéuticos con presidiarios, iniciativas que a su juicio desembocarían en grandes beneficios para la nación y toda la humanidad. Antonio Lafuente, «Conflicto de lealtades: los científicos entre la nación y la República de las Letras», *Revista de Occidente*, 161, octubre 1994: 97-122.

¹⁶ Sobre el concepto de *Big Picture*, ver Andrew Cunningham & Perry Williams, «De-centring the 'big picture': The Origins of Modern Science and the modern origins of science», *British Journal for the History of Science*, 26, 1993: 407-32.



La construcción de telescopios no estaba reservada a los artesanos. Johannes Hevelius (1611-1687), uno de los grandes astrónomos del siglo XVII, construyó los suyos en esta mesa de pulir lentes. Por su parte, Newton desvelará en la *Óptica* algunos de sus secretos para pulir los espejos.

de sus experimentos o con la cruzada divulgadora emprendida por Voltaire? ¿No estábamos tratando del mayor de los genios, del legislador que estableció las leyes que rigen el Universo? En los *Principia Mathematica*, Newton abominaba de las contingencias e identificaba los pilares de su grandiosa arquitectura: «El tiempo absoluto, verdadero y matemático en sí y por su naturaleza, y sin relación a algo externo, fluye uniformemente... El espacio absoluto, por su naturaleza y sin relación a cualquier cosa externa, siempre permanece igual e inmóvil»¹⁷. Fuera, pues, las salpicaduras de lo cotidiano, guerra a los constreñimientos locales y subjetivos.

Una imagen tan ilusoria que sin duda requirió de una leyenda hecha con ingredientes excepcionales: mente prodigiosa, verbo brillante, inteligencia veloz, vida recoleta, y todo ello trufado de laboriosidad, tenacidad, modestia y frugalidad. Es la imagen arquetípica del genio. Sus trabajos sobre la naturaleza de la luz presentaban unos experimentos despojados de pormenores que eludían las dificultades y ocultaban el gran número de veces que hubo de repetirlos para extraer el secreto de los prismas adquiridos en las ferias de Cambridge. Sin embargo, Newton necesitó algo más que un dominio indiscutible de la geometría para triunfar. Poco después de que en 1672 la *Royal Society* empezara a publicitar el trabajo de Newton, jesuitas de toda

¹⁷ Steven Shapin, *La Revolución Científica. Una interpretación alternativa*, Barcelona: Paidós, 2000, p. 87.

Europa y algunos miembros de la *Académie des Sciences* intentaron replicar los experimentos con la luz. Y los resultados fueron negativos¹⁸. Nadie parecía disponer de aquellos prismas maravillosos tan solicitados en los salones de todas las cortes europeas. El escepticismo se extendió y llegaron las dudas sobre cómo discriminar entre un mago y un filósofo natural. En 1715, Newton ya era el gran Newton, presidente de la *Royal Society*, autor de los *Principia* y de la *Óptica*, la primera figura de la ciencia inglesa, y todavía sus teorías eran fuertemente criticadas por su eterno rival Gottfried W. Leibniz. Aprovechando la presencia en Londres de dignatarios franceses y holandeses desplazados con motivo de la coronación de Jorge I, Jean Desaguliers, el experimentador oficial de la *Society* y leal auxiliar de Newton, preparó una serie de demostraciones para desacreditar a los oponentes. Los testigos del experimento fueron cuidadosamente seleccionados y la luz blanca se descompuso en un arco multicolor.

Fueron días de coronación, la del rey de los británicos, también la del príncipe de los científicos. Desde entonces los buenos prismas eran los que se comportaban según Newton predijo, y la óptica inglesa se expandió a la misma velocidad que la industria del vidrio londinense. Siempre que un experimento no seguía el curso «natural» aquilatado por la ortodoxia

¹⁸ El trabajo canónico en este punto es Simon Schaffer, «Glass Works: Newton's Prisms and the Uses of Experiment», en David Gooding, Trevor Pinch & Simon Schaffer (eds.), *The Uses of Experiment. Studies in the Natural Sciences*. Cambridge/New York/Melbourne: Cambridge University Press, 1989, p. 67-104.

newtoniana, se atribuía a la baja calidad de los vidrios o a la escasa formación del experimentador. Este caso, entre muchos, nos habla de un ayuntamiento de mucho futuro entre ciencia, artesanía y negocios. Pero la imagen que eligieron los publicistas para el frontispicio de la *Óptica* de Newton sólo contenía prismas brillantemente iluminados, rechazándose otra que mostraba espectadores y que habría insinuado el carácter social de la práctica científica¹⁹.

La nueva historiografía lleva tiempo explorando la compleja red de relaciones que establecen los científicos entre sí, con los objetos circundantes y con el paisaje del que forman parte. Se trata de explicar cuán heterogéneas fueron las prácticas empíricas y narrativas que alumbraron la idea de que había un solo método para producir hechos experimentales contrastables. En fin, la propia idea de revolución es fruto de una propaganda

¹⁹ Una práctica que contrasta con lo realizado por Boyle, quien narraba sus experimentos con un estilo tan prolijo en los detalles como carente de esquemas conceptuales o representaciones matemáticas. Boyle relataba de forma bastante tediosa todas y cada una de las circunstancias del experimento: dónde y cómo se hizo; quién estaba presente, cuántas veces se repitió, cuáles sus resultados exactos. Esta estrategia para disolver las posibles dudas del lector estaba en las antípodas de la recomendada por Newton: «No es el número de experimentos, sino su peso, lo que hay que considerar; y donde uno basta, ¿para qué se necesitan más?» Shapin, op. cit., p. 148. O, en otros términos, los experimentos tenían una función probatoria de teorías cuyo fundamento era más matemático que experimental, lo que relegaba la rutina del laboratorio a un plano subordinado. Ver también Steven Shapin & Simon Shaffer, *Leviathan and the Air-Pump. Hobbes, Boyle and the Experimental Life*, Princeton: Princeton University Press, 1985; Larry Stewart, op. cit.

consciente y destinada a la autoexaltación de unas instituciones y de sus próceres²⁰.

ALGUNOS TELESCOPIOS

Hacia mediados del siglo XV los conocimientos y las destrezas para la producción de lentes se hallaban bastante avanzados. No fue hasta principios del siglo XVII, sin embargo, cuando el telescopio entró de lleno en el espacio de los instrumentos científicos. Tras ser patentado en 1608 en Holanda por Hans Lipperhey, Galileo construyó el suyo propio a principios de 1609 y lo hizo evolucionar desde los 3 aumentos a los 20. Con este último descubrió en el mes de noviembre las estrellas Mediceas (los satélites de Júpiter). Al año siguiente ya estaba en la calle el *Siderius Nuncius*, opúsculo dedicado a Cosimo II de Médici en el que explicaba tanto el uso del telescopio como las observaciones que había hecho con él. Es difícil minimizar la importancia de la información allí expuesta: la luna tenía una superficie accidentada, no llana, el número de las estrellas era mayor que el supuesto, y los satélites descubiertos rondaban Júpiter, no la Tierra. Los cielos aristotélicos se desmoronaban para dar la razón a los copernicanos.

²⁰ Ver Shapin (2000) y Mario Biagioli y Steven J. Harris (eds.) *The Scientific Revolution as Narrative, Configurations*, 6: 2, 1998.

Ahora bien, seis meses después de que Galileo publicase esta obra sólo tres personas había logrado ver los satélites de Júpiter: el propio Galileo, Cosimo II y Giulio de Médici. Consciente de la necesidad de recibir respaldo por parte de la comunidad de expertos, Galileo había pedido a Cosimo que distribuyese el folleto y telescopios entre la nobleza a través de sus redes diplomáticas²¹. Mientras los telescopios llegaban a manos de los astrónomos, Galileo recibió el respaldo de Johannes Kepler. Era todavía un respaldo fundado en la cortesía y el prestigio del florentino, no en sus propias observaciones. Antes de que terminara el año el astrónomo alemán tuvo la oportunidad de ponerse detrás de un telescopio galileano y dar su testimonio. Los resultados fueron satisfactorios pero parciales. Kepler no llegó a ver cuatro, sino sólo tres de los satélites. Y es que observar con el nuevo instrumento era realmente difícil. Galileo, mejor que nadie, lo sabía: no había conseguido que muchos de los que ya se habían colocado detrás del ocular viesen absolutamente nada. Pero aún cuando el observador fuese hábil, existía otro problema que se puso de manifiesto tan pronto como el padre Cristiano Clavius verificó las observaciones de Galileo en el observatorio del

²¹ Para todo esto, véase especialmente Albert van Helden, «Telescopes and Authority from Galileo to Cassini», *Instruments*, Albert van Helden & Thomas L. Hankins (eds.), *Osiris*, n.º monográfico, vol. 9, 1994, p. 9-29; así como Peter Dear, *Discipline and Experience. The Mathematical Way in the Scientific Revolution*. Chicago: The University of Chicago Press, 1995; y Mario Biagioli, *Galileo Courtier. The Practice of Science in the Culture of Absolutism*, Chicago/London: The University of Chicago Press, 1993.

Colegio Romano. Los reparos del jesuita y sus colegas de la orden estaban en la interpretación a las observaciones, en el acuerdo no sobre lo que se ve sino sobre qué significa lo que se está viendo. Estas dificultades orientaron los problemas de confirmación de las observaciones telescópicas en tres direcciones: en primer lugar, la constatación de la idoneidad del instrumento; en segundo, la consolidación del prestigio del observador; y en última instancia, la producción de métodos de consenso sobre la interpretación de las observaciones.

A partir de 1637, gracias a las mejoras introducidas por Francesco Fontana, que sustituyó el ocular cóncavo por uno convexo, los telescopios disfrutaron de un mayor ángulo de visión (el de Galileo tenía un campo de visión de 15 minutos de arco), permitiendo así mayores aumentos²².

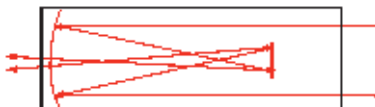
El telescopio de Galileo estaba formado por una lente convexa en el objetivo y otra cóncava en el ocular. Las posteriores mejoras del aparato supusieron la introducción de dos lentes convexas, algo que producía una imagen invertida pero que ampliaba el campo de

²² Sin embargo, las observaciones continuaron siendo problemáticas, como muestra la disputa sobre la figura de Saturno. En 1656 Huygens anunció el descubrimiento de un satélite de Saturno (Titan). Y en 1659 publicó su *Systema Saturnium*, postulando la existencia de un anillo alrededor del planeta. Para consolidar su hipótesis, se apoyó en la calidad de sus instrumentos, así como en su pericia como observador. Eran los mismos argumentos que había esgrimido Hevelius, cuyas observaciones no sostenían su hipótesis. Además, nuevamente desde Roma, el padre Honoré Fabri y el instrumentista Eustachio Divini ofrecían una hipótesis alternativa. Las discrepancias se resolvieron en la Accademia del Cimento en 1660. La prestigiosa institución

visión. Las observaciones demandaban telescopios cada vez más potentes, lo que obligó a ampliar la distancia focal hasta el extremo de que comenzaron a aparecer los telescopios aéreos. El de Huygens de 1684 medía nada menos que 123 pies (37,5 m). Aéreos o no, los enormes telescopios señalaban el límite de lo que se podía esperar de la evolución del galileano. Difíciles de manejar, presentaban además la característica aberración cromática, que se manifestaba en forma de halos en los contornos de los objetos. Esta aberración dificultaba mucho la realización de medidas precisas y hasta mediados del siglo XVIII no se considerará posible corregir este defecto de los telescopios de refracción. Era preciso incrementar la potencia sin aumentar la distancia focal, y corregir al mismo tiempo la aberración cromática. En 1663 James Gregory propuso el primer telescopio de reflexión que conocemos. Se trataba de sustituir la lente del objetivo por un espejo (primario) que colectara los rayos de luz para proyectarlos sobre otro espejo cóncavo que, finalmente, enviaría los rayos a la pequeña abertura del espejo primario.

ordenó entonces la creación de dos modelos que representaran las hipótesis de ambos contendientes y los sometieron a observación con los mejores telescopios. Las variaciones en la apariencia de Saturno quedaban mejor explicadas con el anillo de Huygens. Poco tiempo después, en 1664, la misma academia desarrolló unas tablas, semejantes a las que hoy leemos para diagnosticar el grado de agudeza visual, para determinar qué telescopios eran mejores que otros. Nacían así los primeros sistemas de simulación de las observaciones y los test de homologación de instrumentos que garantizarán la dimensión científica de las observaciones sistemáticas de la comunidad de astrónomos. (Van Helden, op. cit., 20ss).

Esquema
de un telescopio
gregoriano



Debido a la dificultad constructiva que planteaba este diseño, Gregory no consiguió ver un prototipo. Será Newton quien aportará una explicación de las causas de la aberración cromática, ofrezca una solución teórica y la lleve a la práctica. La ganancia del nuevo modelo era evidente: el telescopio de reflexión de Newton de 1671 medía sólo 6 $\frac{1}{3}$ pulgadas (16 cm) y tenía un aumento de 38; el modelo de refracción de Huygens de 1656 tenía 23 pies de largo y conseguía cien aumentos. Los reflectores, sin embargo, presentaban un problema: la aberración esférica²³.

²³ Newton era consciente de que esta aberración sólo podía ser corregida si el espejo primario era parabólico, como Descartes había mostrado. Pero producir espejos parabólicos, así como espejos lo suficientemente planos como para que no creasen distorsiones, no estaba al alcance de las destrezas de la mayoría de los artesanos de la época. Por eso el espejo primario de sus prototipos es esférico; como Huygens reconoció. También esa fue la razón de que Newton sustituyese el espejo plano por un prisma en su *Óptica* (1704). En 1722 John Hadley comenzó a producir espejos paraboloides. A mediados de siglo John Short fue capaz no sólo de producir con cierta rapidez estos espejos, sino que además perfeccionó considerablemente la técnica de producción de espejos asféricos. Fue entonces cuando los telescopios newtonianos mostraron todas sus ventajas: la economía del observatorio, que ya no precisaba una gigantesca cúpula, la facilidad de su transporte y la eliminación de la aberración cromática, que reducía notablemente la ambigüedad de la observación y aumentaba la precisión. El telescopio de Newton se convirtió así en el telescopio de los aficionados: el mejor de los instrumentos era además el más público.

El techo tecnológico de un instrumento se establece a partir de la comprensión de los principios teóricos que lo rigen, la capacidad para realizar los cálculos necesarios para producir el prototipo y la disponibilidad de materiales apropiados para su construcción. En cualquier caso, cómo se establecen cuáles son los materiales adecuados es algo en absoluto independiente de los mecanismos de convicción de la verosimilitud de los enunciados teóricos.

PRISMAS CRUCIALES, PRÁCTICAS EXPERIMENTALES

En 1690, tras veinte años de publicaciones sobre el experimento crucial de los prismas de Newton²⁴, todavía no estaba claro qué es lo que probaba el experimento, ni se le había revestido de suficiente autoridad como para que no fuese puesta en cuestión su categoría de crucial. La versión de Newton sobre las implicaciones del mismo osciló a lo largo del tiempo. Desde 1672 mantuvo controversias con los ópticos Ignace Pardies y Robert Hooke, y al año siguiente con

²⁴ En 1666, el año en que comienza a trabajar con prismas, este tipo de artillugios ya circulaban por el mercado. Como Schaffer señaló, las teorías de Descartes sobre los colores había hecho de ellos un objeto de discusión importante. Pero no fue hasta los experimentos de Newton cuando se convirtieron en instrumentos para explicar la composición y comportamiento de la luz. Y, sin embargo, tardarán en adquirir este estatuto.

Huygens. Particularmente, la intervención de Huygens en la disputa para apoyar la tesis de Hooke de que el color blanco podía componerse a partir del amarillo y el azul hizo especial mella en la firmeza de las tesis newtonianas sobre el color. Jamás volvió a postular la proposición 7 del artículo de 1672: la teoría de la composición del color se restringiría a la de la composición de la luz²⁵. En 1676 todavía mantenía que el experimento crucial no mostraba nada respecto de los colores. Como sus críticos señalaron, el experimento no mostraba que los colores fueran cualidades primarias e inmutables de la luz antes de la refracción, aunque sí que la luz blanca estaba formada por rayos con grados de refrangibilidad desigual. Lo segundo podía mostrarlo de forma matemática, pero no lo primero. Esta falta de contundencia experimental fue uno de los frenos para lograr autoridad y consenso en torno a la hipótesis de la composición de la luz por rayos primarios caracterizados por diferentes índices de refrangibilidad que producían los colores. El otro, como dijimos, era la dificultad para replicar el experimento.

Durante años Newton se esforzó en producir un protocolo exhaustivo del experimento, haciendo especial hincapié en la calidad de los prismas. La insistencia estaba justificada. No sólo porque había sido acusado de ocultar pasos decisivos en su proceder o

²⁵ Alan E. Shapiro, «The Evolving Structure of Newton's Theory of White Light and Color», *Isis*, 1980, 71, p. 211-235.

porque sus prismas hubieran sido impugnados desde Venecia, París o Leipzig. Uno de los presupuestos básicos del experimento era que los rayos de luz solar no se veían afectados en sus cualidades por la refracción, ni por el medio, ni interactuaban entre ellos. Eran inmutables y connaturales a la luz solar. Este presupuesto era necesario para establecer la conexión entre lo que sucedía en el ámbito experimental y lo que sucedía en la vida cotidiana. Pues no bastaba que la luz blanca fuese producto de la combinación de todos los colores, sino que esto se aplicase a la luz del sol. La inmutabilidad era el meollo del experimento de los dos prismas, en el cual se mostraba que tras una segunda refracción los rayos primarios permanecían inalterables. Pero era difícil hacerlo extensible a los rayos heterogéneos del sol. La connaturalidad de los rayos primarios u homogéneos a la luz solar, es decir, que la luz solar estaba efectivamente compuesta por rayos primarios, era aún más difícil de mostrar observacionalmente²⁶.

²⁶ Para abrir paso a la aceptación de su tesis, Newton —a través de Desaguliers— se centró en crear los mecanismos que garantizaran la mayor cohesión en torno a su interpretación sobre el experimento de los dos prismas. Dio todas las pautas posibles que debían seguirse al realizarlo, describió las características precisas de los prismas e hizo gravitar el éxito o fracaso del mismo sobre la calidad de los instrumentos. En torno a 1720 este argumento cobrará tal importancia que los informes sobre reproducciones fallidas del experimento serán puestas en tela de juicio sólo por el origen del cristal. En efecto, el éxito descansaba en lograr una descomposición nítida del espectro de la luz. Una ligera concavidad de los prismas podía hacer fracasar la experiencia. Y también la falta de claridad, la presencia de burbujas, etc. (Schaffer, op. cit.).

Tras el despliegue de demostraciones llevadas a cabo en Londres por Desaguliers desde 1714, parecía que el experimento podría tener éxito siempre que se realizase con prismas ingleses. El experimento servía para discriminar los buenos y los malos prismas, ocioso es recordar que los primeros eran los que corroboraban la ley. A estas alturas los lectores de la *Óptica* (1704) habían admitido que, aunque Newton nunca hubiera podido probarlo, los rayos primarios eran inmutables y constitutivos de la luz blanca. Los experimentos no servían para convencer a los críticos, pero sí para identificar comunidades, agrupaciones en torno a una forma determinada de plantear y resolver el problema. Gentes dispuestas a analizar con minuciosidad la composición geométrica de los experimentos fallidos, a medir con cuidado (o predecir por los efectos) las irregularidades de sus prismas, a discutir la distancia a la que debía estar situada una lente de colimación. Y todo ello con independencia de que el experimento mismo tuviese valor probatorio.

Cuando los sistemas de producción de vidrio permitieron producir masivamente los prismas para adornar los salones, la teoría de Newton experimentó una liberación decisiva. Si el techo tecnológico de la producción de telescopios no fue de gran ayuda para su autoridad, el de los prismas jugó indudablemente a su favor. Cabe preguntarse si su teoría hubiese sido considerada correcta si los prismas venecianos hubiesen resistido la prueba de la medición de los ángulos y el requisito de su claridad (algo en lo que, en principio, no

existía un acuerdo general). Y es que no puede minusvalorarse la imposición de los modelos explicativos sobre la mirada. Ni el hecho de que las restricciones materiales y teóricas del instrumental tienen, además de una dimensión física, una dimensión política.

EL MICROSCOPIO Y LA VIDA INVISIBLE

A pesar de las mejoras del telescopio y la creciente complejidad de las demostraciones experimentales, observar siguió siendo una tarea difícil. Las observaciones, para cumplir su finalidad de consensuar el funcionamiento del mundo físico, debían poder ser reducidas a valores numéricos: posiciones estelares, ángulos de refracción, tiempos de tránsito... No era fácil, las disparidades estaban a la orden del día. Pero incluso allí donde este tránsito de un lenguaje descriptivo a otro matemático no era demandado, la asociación entre formas y cualidades se volvía muy problemática. Veamos si no qué sucedió con el microscopio.

A finales del siglo XVII ya era posible construir en serie microscopios, y se discriminaba entre microscopia *ludicra* y microscopia *seria*. A pesar de que los instrumentos ópticos del siglo anterior habían permitido a Leeuwenhoek identificar no sólo protozoos (*infusoria*) sino bacterias y bacilos, las dificultades en la replicabilidad de las experiencias, así como las relativas a

la interpretación de la función y naturaleza de los microorganismos, condujo a reacciones dispares. Mientras que a finales del XVII y a principios del XVIII los *animacula* se encontraban en todas partes (en los testículos, entre los dientes, en el agua, en los intestinos, en los fetos, en el aire, en la carne corrupta o en el mo-
ho), en 1753 Henry Baker restringió su presencia en el cuerpo humano exclusivamente al semen. Algunos especialistas arguyeron que la omnipresencia de tales «gusanos» obedecía a las aberraciones ópticas de los primeros microscopios. Además, era difícil encajar su presencia en el contexto de un plan divino. Eran seres asociados a la corrupción, la suciedad y la enfermedad. Y podían destruir formas de vida más complejas. La teoría del contagio sólo cobraría carta de ciudadanía hasta la llegada de Pasteur.

En realidad, los microscopios de lente simple que utilizaron Leeuwenhoek, Hooke y Huygens eran notablemente precisos para la época²⁷. La lente de un microscopio de gran aumento consistía en una gota esférica de vidrio de dimensiones minúsculas, engarzada entre dos placas metálicas, en una de las cuales se situaba una aguja en la que se soportaba el objeto. La mejor de las lentes de Leeuwenhoek que se con-

²⁷ Cf. Catherine Wilson, *The Invisible World. Early Modern Philosophy and the Invention of the Microscope*, Princeton: Princeton University Press, 1997; Catherine Wilson, «Visual Surface and Visual Symbol: The Microscope and the Occult in Early Modern Science» en John W. Yolton (ed.), *Philosophy, Religion and Science in the 17th and 18th Centuries*, Rochester: Rochester University Press, 1990.

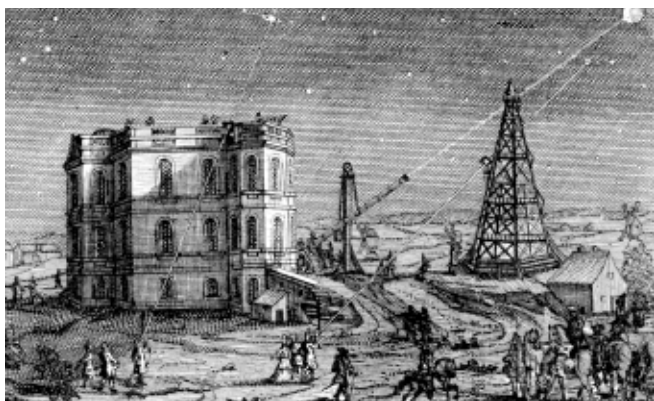
serva tiene 1,2 mm de diámetro, y consigue aproximadamente 270 aumentos (x270), pero es posible que llegase a crear lentes de x770²⁸. En lo que respecta a las lentes creadas a partir de una gota de vidrio y sin necesidad de pulir, Giovanni Maria de la Torre conseguirá obtener en la segunda mitad del siglo XVIII lentes de x3.200 de apenas 0,5 mm de diámetro. No obstante estas resoluciones, las pequeñas lentes planteaban problemas técnicos y exigían tal esfuerzo por parte del observador que el uso de las más pequeñas se vio notablemente limitado. La cantidad de aumentos es inversa al tamaño de la lente, i.e. al campo de visión, y a la cantidad de luz recibida, provocando un oscurecimiento de la imagen. Así las cosas, a mediados del siglo XVIII, pese a considerarse que el microscopio simple era el único instrumento que podía producir grandes descubrimientos, se optó por el uso del microscopio compuesto, menos potente pero más cómodo. Aunque algunos microorganismos podían ser visto con una lente de x40, y que protozoos, bacterias y corpúsculos sanguíneos eran visibles con una de x275, las dudas sobre la naturaleza animada de aquellos corpúsculos persistió, entorpeciendo el desarrollo de las investigaciones microscópicas. Enfrentados a la acumulación de datos que, a través de los trabajos de Divini, Leeuwenhoek o Huygens, fueron configurando una nueva historia natural de seres diminutos,

²⁸ Edward G. Ruestow, *The Microscope in the Dutch Republic. The Shaping of Discovery*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

los científicos simplemente no supieron cómo incluir los nuevos descubrimientos de microorganismos en su marco teórico. Así suele ocurrir, en efecto, puesto que la proliferación de entes o hechos naturales no produce conocimiento hasta que no son integrables en una hipótesis explicativa. Lo que carece de modelo, carece de existencia.

UNIFORMANDO LAS MIRADAS

Los distintos modos de aproximación a la lente expresaban discrepancias sobre el concepto de la experiencia colectiva. La fascinación por lo extraordinario dejó de ser un rasgo científico para convertirse en símbolo de ingenuidad y torpeza, de falta de raciocinio o conocimiento y ausencia de análisis. Pasó a ser sustituido por una lógica que obligaba a justificar la innovación, consolidar la estabilidad y que acabó por arrogarse el monopolio de la comprensión de la imagen científica. Desde esta perspectiva, que exigía el control de la observación, el microscopio había expandido ilegítimamente el espacio de la vida. Había colonizado la mirada de los distintos estratos sociales sin haber logrado un consenso sobre su transparencia, es decir, sobre sus límites de error. Había invadido el orden físico y material sin haber elaborado teorías adecuadas. En esta prevención hacia el instrumento como causa de la profusión de la vida, sin embargo, había algo genuino



Como muestra este grabado del Observatorio de París, en el que tres grandes telescopios, que apuntan a objetos diferentes, posiblemente Marte, Saturno y Júpiter, (además de varios de pequeña envergadura situados en el tejado del mismo), las miradas eran simultáneas y múltiples. Era difícil ponerlas de acuerdo para alcanzar las cotas de precisión que requerían determinados cálculos sin transmitir pautas muy claras sobre la construcción y el manejo de los instrumentos.

y penetrante, en cierto modo profético: el descubrimiento de la responsabilidad de los materiales, de su tendencia a independizarse de las fuentes de autoridad cuando entraban en la dinámica del consumo.

Es cierto que Newton se sintió agredido por las críticas derivadas de la publicación de la teoría de la luz y los colores. Pero era este juego de réplicas y correcciones, precisamente, lo que contribuía a definir en qué consistía el conocimiento público y cómo era posible articular estrategias para hacerlo expresable, comparable y replicable. Con el tiempo, las servidumbres del conocimiento público se trasladaron hacia los consensos en torno al conocimiento preciso.

También la decisión de Galileo de hacer circular sus telescopios había formado parte de una dinámica de definición de los mecanismos. Los termoscopios, termómetros y barómetros tuvieron que circular profusamente hasta alcanzar un acuerdo sobre qué era lo que medían. Dirimidas estas disputas, surgieron nuevas complicaciones. Garantizar la comparatividad de los resultados era decisivo a la hora de establecer regularidades. Por esta razón, James Jurin, secretario de la Royal Society, hizo un llamamiento para que los curiosos enviaran anualmente observaciones meteorológicas. Publicado en las *Philosophical Transactions* (1723, n° 379), el reclamo incluía unas instrucciones sobre el modo en que debían realizarse. Por si fuera poco, recomendaba el uso de instrumentos contruidos por Francis Hauskbee el joven, y para garantizar la uniformidad de las observaciones procuró que se enviaran dieciocho de estos instrumentos por toda Europa en los años inmediatos²⁹.

Dieciocho barómetros no son muchos. Tampoco lo fueron la escasa decena de bombas de aire de Boyle que contribuyeron a consolidar la existencia del vacío³⁰. Había una gran desproporción entre la simplicidad de los instrumentos, la pequeñez del laboratorio y la magnitud de los objetos que crean. Una des-

²⁹ Andrea Rusnock, «Hippocrates, Bacon, and Medical Meteorology at the Royal Society, 1700-1750», David Cantor (ed.) *Reinventing Hippocrates*. Aldershot/ Burlington/ Singapore/ Sydney: Ashgate, 2002, p. 136-153; Abraham Wolf, *A History of Science, Technology, and Philosophy in the 16th, 17th and 18th Centuries* [Reimp. de las eds. 1935 y 1938]. 2 vol. Bristol: Thoemmes Press, 1999, vol. I.

³⁰ Shapin & Schaffer, op. cit, p. 229.

proporción, en todo caso, que se hizo sentir con mayor fuerza a partir de mediados del siglo XVIII, cuando el número de instrumentos se incrementó lo suficiente como para que en el mismo lugar se realizasen observaciones telescópicas simultáneas³¹. O como para que nuevos actores adoptaran otras actitudes y surgieran críticas nuevas sobre las asunciones clásicas del conocimiento científico³².

Sin duda alguna, ahora y entonces los instrumentos siempre contribuyeron tanto a la consolidación como a la problematización de la propia actividad científica. La observación tendió a hacerse cada vez más pública, cada vez más visible, uniforme y corregible. Por eso mismo, los instrumentos en general y los telescopios y microscopios en particular, aquellos que extendieron la facultad humana máspreciada entre los modernos

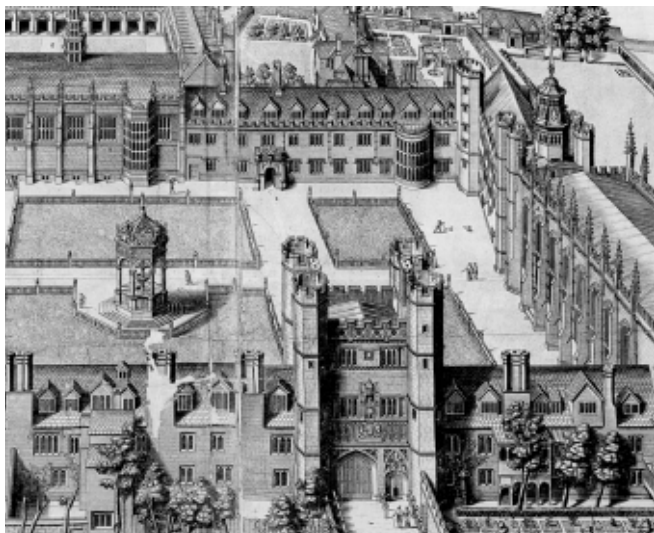
³¹ Sobre los efectos disciplinares de las observaciones simultáneas en el siglo XIX véase, Simon Schaffer, «Astronomers Mark Time: Discipline and the Personal Equation», en *Science in Context*, 1988, 2:1, p. 115-145; Lorraine Daston & Peter Galison. «The Image of Objectivity» en *Representations*, 1992, 40, p. 81-128. Un estudio circunscrito a la España de la segunda mitad del XVIII en Nuria Valverde, *Instrumentos científicos, economía moral y opinión pública en la Ilustración española*, tesis doctoral inédita, Antonio Lafuente (dir.), UAM, 2004.

³² Pensemos por ejemplo en el padre Martín Sarmiento, para quien la analogía entre el rayo que salía de una máquina eléctrica y el de una tormenta era una posibilidad sugerente, pero no lo suficientemente contrastada como para respaldar la instalación de un pararrayos. «Así que leí la analogía entre los relámpagos, truenos, y rayos con la máquina Eléctrica, no halle mucha Dificultad en dejarme llevar del pensamiento (...) Pero en quanto al modo que se propone de apartar los rayos de un Edificio, o de un Navío, estoy en ánimo de no Creerlo, hasta que se aclare más. [...]. Decir que por medio de una larga Soga se podrá dirigir la malignidad a otra parte es hacer la Cuenta sin la huespeda» (Carta del 22 de Junio de 1752 al Duque de Medina Sidonia, BNE, Mss).

—la vista—, se convirtieron en herramientas políticas de primera magnitud. Sin la publicidad del conocimiento tecnológico difícilmente habrían alcanzado este rango. Y, sin embargo, el descubrimiento de la conexión entre eficiencia informativa y problematización de los resultados comprometió la coherencia con su entorno cultural. Tenemos ejemplos recientes que quizás no difieran tanto de los casos que hemos relatado: desde el secreto que rodeó las grandes inversiones de las agencias estatales a partir de la Segunda Guerra Mundial, hasta el desplazamiento que suelen sufrir las opciones alternativas o locales que no suscriben aquellas teorías dependientes de aparatos tecnológicos definidos de forma muy restrictiva.

Lo que es indudable es que mirar y disciplinar la vista, fabricar evidencias y acordar prácticas, siempre fueron actividades complejas y sometidas a fuertes controversias. Los textos que aquí presentamos así lo traslucen.

Son obra de quien Pope retrató como el mayor de los mortales. Y proceden de un tiempo que muchos quisieron identificar como una suerte de edad de la inocencia de la vida experimental. A la fecha de hoy, sin embargo, sabemos bien que las dificultades técnicas y de mercado, las divergencias sobre cómo consensuar todas y cada una de las miradas, presidieron los orígenes mismos de la disposición a contemplar un mundo común y variado.



Trinity College. Hijo de un granjero del condado de Lancashire, Isaac Newton ingresó en Trinity College en 1661 por recomendación de un tío suyo. Obtuvo allí su primer grado en 1661, poco antes de desencadenarse una epidemia de peste que hizo cerrar la Universidad de Cambridge durante varios meses. Es el *annus mirabilis*. En 1669 ocupó la cátedra *lucasiana* que había ostentado Isaac Barrow hasta su muerte. Impartía sus lecciones una vez a la semana durante uno de los tres trimestres del curso. No duraban más de una hora, pero eran seguidas de al menos cuatro horas dedicadas a los alumnos, reuniones que a menudo tenían lugar en su propia estancia. Jamás repitió sus lecciones de un curso a otro.



Newton, con ayuda de sus seguidores, conseguiría transformar el maravilloso fenómeno de los colores en la evidencia de la composición de la luz. Pero el significado de la luz para Newton irá más allá de las leyes de la óptica. La fascinación por este elemento hundía sus raíces en una tradición alquímica que buscaba comprender los principios de composición y descomposición de los diferentes elementos.

NUEVA TEORÍA
DE LA LUZ
Y LOS COLORES

NOTA

El siguiente texto es una traducción del inglés de *Philosophical Transactions of the Royal Society*, nº 80 (19 de febrero 1671/72), pp. 3075-87. La numeración roja entre corchetes corresponde a la paginación del original, y las notas a la traducción van al final de la misma.

CARTA DEL SR. ISAAC NEWTON, PROFESOR DE MATEMÁTICAS EN LA UNIVERSIDAD DE CAMBRIDGE, CONTENIENDO SU NUEVA TEORÍA DE LA LUZ Y LOS COLORES, ENVIADA POR EL AUTOR AL EDITOR DESDE CAMBRIDGE, EL 6 DE FEBRERO DE 1672, PARA COMUNICARLA A LA ROYAL SOCIETY.

Señor,

Para cumplir mi reciente promesa, le diré sin más ceremonia, que a principios del año 1666 (época en la que me dedicaba a pulir lentes de forma no esférica) me hice con un prisma triangular de cristal, con el fin de recrear el muy conocido fenómeno de los [3076] colores. A tal efecto deje mi cuarto en la oscuridad e hice un pequeño agujero en el postigo para que entrara una adecuada cantidad de luz del sol. Coloqué mi prisma junto al agujero para que la luz se refractara hacia la pared opuesta del cuarto. Al principio fue una diversión muy agradable ver los colores vivos e intensos así producidos. Pero después de un rato me puse a considerarlos de una manera más prudente, y me asombró ver que tenían una forma oblonga, aunque según las leyes aceptadas de la refracción esperaba que fuesen circulares².

A los lados terminaba en líneas rectas, pero hacia los extremos la luz mermaba de forma tan gradual que

resultaba difícil determinar su forma exacta, aunque parecía semicircular.

Al comparar el largo de este espectro de colores con su ancho, percibí que medía alrededor de cinco veces más; una desproporción tan exagerada que me inspiró una extraordinaria curiosidad por examinar de dónde podría proceder³. Apenas podía creer que los distintos grosores del cristal o el límite de la sombra, pudieran influir sobre la luz para producir dicho efecto; no obstante, decidí que no estaría de más examinar dichas circunstancias. Así que intenté comprobar qué pasaría al transmitir la luz a través de secciones del cristal de distinto grosor, o a través de agujeros de diferente magnitud en la ventana, o cuando se coloca el prisma por fuera para que la luz pasara a su través y se refractara antes de topar con el agujero. Pero comprobé que ninguna de estas circunstancias era importante. En todos los casos la forma de los colores fue igual.

Luego sospeché que la diferente dilatación de los colores podría deberse a algún desperfecto en el cristal u otra irregularidad fortuita. Y para probarlo tomé otro prisma igual al anterior y lo coloqué de manera que la luz, al atravesar los dos, se refractara en distintas direcciones contrarias, de forma que el último volviera los rayos al camino del cual fueron desviados por el primer prisma. Pensé pues que de esta manera los efectos regulares del primer prisma los destruiría el segundo, mientras que los irregulares serían multiplicados debido a la multiplicidad de refracciones. El hecho fue que la luz difundida por el primer prisma en forma oblonga, fue

convertida por el segundo a una forma circular tan regular como si no hubiera pasado a través de ambos. De manera que, fuera cual fuese la causa del alargamiento, no no se debió a ninguna irregularidad accidental. [3077]

Después pasé a examinar más críticamente lo que podría ser comprobado según la distinta incidencia de los rayos procedentes de distintas partes del Sol; y, a tal fin, medí los distintos ángulos y líneas pertenecientes a la imagen. La distancia desde el agujero o al prisma fue de 22 pies [6,7 m], su mayor largo $13\frac{1}{4}$ pulgadas [33,7 cm], el ancho $2\frac{5}{8}$ [6,8 cm], el diámetro del agujero de $\frac{1}{4}$ de pulgada [6 mm]. El ángulo entre los rayos, prolongados hacia el centro de la imagen, respecto de la línea que habrían seguido sin sufrir refracción, fue de $44^{\circ} 56'$. Y el ángulo vertical del prisma $63^{\circ} 12'$. Además las refracciones en los dos lados del prisma (es decir, de los rayos incidentes y emergentes) eran prácticamente iguales, y por consiguiente de unos $54^{\circ} 4'$. Y los rayos incidían perpendicularmente sobre la pared⁴. Pues bien, restando el diámetro del agujero del largo y del ancho de la imagen, conformada por los rayos que pasaron por el centro del agujero, queda un largo de 13 pulgadas y un ancho de $2\frac{3}{8}$ y, en consecuencia, el ángulo subtendido por el agujero de esta anchura fue de aproximadamente unos $31'$, asimilable al del diámetro del Sol. Pero el ángulo subtendido por el largo medía más de 5 veces el diámetro, concretamente $2^{\circ} 49'$.

Hechas las observaciones, calculé el poder refractivo del cristal, encontrando por la razón entre senos que su valor era 20 a 31. Luego, empleando esta proporción,

calculé la refracción respectiva de dos rayos provenientes de los extremos opuestos del disco del sol, para que difirieran en $31'$ en la oblicuidad de su incidencia: y deduje que los rayos emergentes debían formar un ángulo de unos $31'$ antes de incidir, como así sucedió.

Pero como este cálculo se basó en la hipótesis de la proporcionalidad de los senos de incidencia y de refracción, que nunca pude imaginar por mi propia experiencia que fuera tan errónea como para producir un ángulo de sólo $31'$ cuando en realidad era de $2^\circ 49'$, la curiosidad me animó a volver a tomar mi prisma. Lo coloqué hacia la ventana, como antes, y observé que al girarlo un poco sobre su eje para variar su oblicuidad respecto a la luz con un ángulo de 4 ó 5 grados, los colores no se movían de forma apreciable de su posición en la pared y, por lo tanto, la variación de la incidencia no cambiaba sensiblemente el grado de refracción. Tanto por este experimento, como también por el cálculo mencionado, era evidente que la diferente incidencia de los rayos que proceden [3078] de distintas partes del Sol, no podría, tras su entrecruzamiento, divergir con un ángulo apreciablemente más grande que aquél con el que antes convergían: y puesto que como mucho era de unos $31'$ ó $32'$, quedaba por descubrir otra causa que diera cuenta de los $2^\circ 49'$.

Entonces comencé a sospechar si los rayos, tras atravesar el prisma, no se moverían en líneas curvas y si, según su mayor o menor curvatura, se dirigirían hacia las distintas partes de la pared. Y crecieron mis sospechas al acordarme de haber visto a menudo una pe-

lota de tenis que, al ser golpeada oblicuamente por la raqueta, describía una línea curva. Pues, dado que el golpe le transmite un movimiento circular así como progresivo, las partes del lado en donde coinciden los dos movimientos oprimirán y batirán el aire con más violencia que las del otro, haciendo que la resistencia y la reacción del aire sean allí proporcionalmente mayores. Por la misma razón, suponiendo que los rayos de luz fueran cuerpos globulares y que en su pasaje oblicuo de un medio a otro adquirieran un movimiento circular, deberían entonces experimentar mayor resistencia del éter ambiental por donde los dos movimientos de suman y, en consecuencia, por eso desviarse hacia el otro lado. Pero a pesar del fundamento plausible de tal sospecha, cuando la examiné no pude encontrar ninguna evidencia de curvatura. Y además (y esto fue suficiente para mi propósito) percibí que la diferencia entre el largo de la imagen y el diámetro del agujero por donde pasaba la luz, era proporcional a la distancia entre ellos.

La aclaración gradual de estas sospechas me llevó por fin al siguiente *Experimentum Crucis*⁵: tomé dos tablas, y puse una cerca por detrás del prisma al lado de la ventana, de manera que la luz pudiera pasar por un pequeño agujero, hecho a propósito, y cayera sobre la otra tabla que había colocado a unos 12 pies [3,7m], habiéndole hecho también a ella un pequeño agujero para que pasara una parte de la luz incidente. Luego puse otro prisma detrás de la segunda tabla, de manera que la luz, al atravesar las dos tablas, pudiera además atravesar el

prisma y volver a refractarse antes de llegar a la pared. Acto seguido, tomé el primer prisma en la mano y lo giré lentamente de un lado a otro alrededor de su eje para que las diversas partes de la imagen que recaían sobre la segunda tabla, fueran pasando sucesivamente a través del agujero en la misma, y poder así observar en qué punto de la pared las refractaría el segundo prisma. [3079] Y percibí por la variación de dichos lugares que la luz, en la franja próxima al extremo de la imagen hacia la cual refractaba el primer prisma, sufría una refracción en el segundo prisma notablemente mayor que la luz que estaba al otro extremo. Así comprobé que la verdadera causa de la extensión de la imagen no era otra sino que la luz consta de rayos de diferente refrangibilidad los cuales, sin importar las diferencias en la incidencia, se transmiten hacia diversas partes de la pared según su grado de refrangibilidad.

Cuando ya me di cuenta de esto, abandoné mis anteriores trabajos con las lentes: comprendí entonces que la perfección de los telescopios había sido limitada hasta ahora, no tanto por la falta de lentes correctamente formadas según las instrucciones de los autores de óptica (tal y como se había supuesto), sino porque la luz misma está hecha con una mezcla heterogénea de rayos que se refractan de manera diversa. Así que, aunque una lente estuviera perfectamente formada para recoger todos los rayos en un solo punto, no podría recoger en el mismo punto todos los que, con la misma incidencia, experimentarían en ese mismo punto una distinta refracción. Más aun, me maravillé

de que, siendo el índice de refrangibilidad fuera tan grande como lo hallé, hubieran alcanzado los telescopios su actual grado de perfección. Porque, al analizar las refracciones en uno de mis prismas, descubrí que, suponiendo que el seno [del ángulo] de incidencia sobre uno de sus planos fuera de 44 partes, el seno [del ángulo] de refracción de los rayos del extremo del color rojo, producido en el paso del cristal al aire, sería de 68 partes, y el seno de refracción de los rayos correspondientes al otro extremo sería de 69. Así que la diferencia es de alrededor de un $1/24$ o $1/25$ de la refracción entera. Por lo que el objetivo de cualquier telescopio es incapaz de recoger todos los rayos que provienen de un punto de un objeto y hacerlos converger en su foco en un espacio circular de un diámetro menor que un $1/50$ del diámetro de su abertura; lo que es una irregularidad varios centenares de veces más grande que la que causaría una lente circular imperfecta, tan pequeña como los objetivos de los telescopios largos, si la luz fuera uniforme.

Esto me hizo pensar en las reflexiones y, al encontrarlas regulares, es decir que el ángulo de reflexión de cualquier tipo de rayo era igual al ángulo de incidencia, comprendí que debido a la reflexión los instrumentos ópticos podrían alcanzar cualquier grado de perfección imaginable, siempre que tengamos una superficie reflectante [3080] que pudiera pulirse tan delicadamente como el cristal y que reflejara tanta luz como la que transmite el cristal, así como disponer del arte para dotarla con una forma parabólica.

Parecía haber grandísimas dificultades, incluso llegué a creerlas insuperables, hasta que caí en que cada irregularidad en una superficie reflectante desvía los rayos de su curso 5 ó 6 veces más que la misma irregularidad en una refractante. O sea que requerían mucho más cuidado que el de pulir las lentes de refracción.

En medio de estas consideraciones me vi obligado a abandonar Cambridge debido a la aparición de la peste, y pasaron más de dos años hasta que pude seguir adelante⁶. Pero entonces, habiendo pensado en una manera delicada de pulir el metal que, según imaginé, también corregía totalmente la forma, empecé a comprobar lo que se podría lograr de esta manera. Poco a poco perfeccioné un instrumento (parecido en lo esencial al que envié a Londres) hasta tal punto que se podían distinguir los cuatro satélites de Júpiter, lo que mostré varias veces a dos conocidos míos. También podía distinguir las llamadas fases lunares de Venus, aunque sin mucha nitidez, pese al esmero en el manejo del instrumento.

Se interrumpió mi trabajo entonces y no lo retomé hasta el pasado otoño, cuando fabriqué el otro. Y puesto que fue sensiblemente mejor que el primero (sobre todo con objetos diurnos) no me cabe duda de que alcanzarán una mayor perfección con los esfuerzos que, según me cuenta, se están haciendo en Londres.

También he pensado algunas veces en construir un microscopio que tuviera una pieza reflectante de metal en lugar de una lente. Y espero que [la Royal Society] lo tome en cuenta, pues estos instrumentos parecen tan capaces de mejorar como los telescopios, y

puede que más, porque sólo necesitan una pieza de metal reflectante, como se puede apreciar en el dibujo adjunto, donde AB es la pieza de metal, CD el ocular, F el foco común, O el otro foco del metal donde se coloca el objeto. [3081]



Pero dejando ya esta digresión, le decía que la luz no es uniforme ni homogénea, sino que se compone de rayos diversos, cada uno de los cuales se refracta de distinta manera. Entonces de todos los que inciden de la misma manera sobre un mismo medio, algunos se refractarán más que otros, y esto no se debe a ninguna virtud del cristal u otra causa exterior, sino a la predisposición de cada rayo para experimentar un grado determinado de refracción.

Pasaré ahora a informarle sobre otra notable irregularidad de los rayos, que desvela el origen de los colores. A este respecto primero sentaré la doctrina y luego, para comprobarla, daré uno o dos ejemplos de los experimentos, como muestra de los demás.

Encontrará la Doctrina incluida y demostrada en las siguientes proposiciones.

1. Así como los rayos de luz difieren en su grado de refrangibilidad, también varían en su disposición a ma-

nifestar un color particular u otro. Los colores no son ni cualidades de la luz derivadas de la refracción, ni reflejo natural de los cuerpos (como se cree generalmente), sino propiedades originales e innatas, que varían en cada distinto rayo. Algunos rayos tienen la predisposición a manifestar un color rojo y ningún otro, otros el amarillo y no otro, otros el verde y ningún otro, y así sucesivamente. Y no sólo hay rayos propios y particulares para los colores más importantes, sino también para todas las graduaciones intermedias⁷.

2. El mismo color siempre se corresponde con el mismo grado de refrangibilidad, y el mismo grado de refrangibilidad con el mismo color⁸. Los rayos que menos se refractan, están todos predispuestos a manifestar el color rojo y, al contrario, los rayos dispuestos a exhibir el color rojo son los que se refractan menos. Asimismo los rayos que se refractan más están todos predispuestos a manifestar el color violeta oscuro y, al contrario, los rayos dispuestos a manifestar tal color violeta son los que más se refractan. Y así a todos los colores intermedios de una serie continua, les corresponden grados intermedios de refrangibilidad. Y esta analogía entre los colores y la refrangibilidad es muy precisa y estricta: pues los rayos siempre concuerdan o desacuerdan respectivamente en ambas cosas.

3. El tipo de color y el grado de refrangibilidad propio de cualquier tipo de rayo no pueden cambiarse ni por refracción, ni por reflexión en los cuerpos naturales, ni por otra causa que pudiera observar. Cuando algún tipo de rayos ha sido bien separado [3082]

de los de otro tipo, mantuvo luego tenazmente su color, resistiendo todos mis esfuerzos para cambiarlo. Lo he refractado con prismas y lo he reflejado en cuerpos que a la luz del día eran de otros colores; lo he interceptado con una capa de aire coloreado comprimida entre dos placas de cristal; lo he transmitido a través de medios coloreados, y a través de medios irradiados con otros tipos de rayos, y lo he interceptado de diversas maneras. Sin embargo, nunca logré producir otro color. Por contracción o dilatación se hacía más vivo o más pálido, y en algunos casos se hacía muy borroso u oscuro por la pérdida de muchos rayos, pero nunca lo vi cambiado *in specie*.

4. Sin embargo, se pueden producir lo que parecen transmutaciones de color, en las que hay mezcla de tipos distintos de rayos, pues en tales mezclas no aparecen los colores principales, sino que por su efecto mutuo, aparece un color intermedio. De manera que si por refracción o por cualquier otra de las causas mencionadas se separan los diversos rayos latentes en la mezcla, saldrán colores distintos del color de la combinación. Dichos colores no son nuevos, sino que sólo se manifiestan al separarse, y si se vuelven a combinar y mezclar por completo, volverán a componer el mismo color que antes de la separación. Y por el mismo motivo, las transmutaciones efectuadas por la combinación de distintos colores no son reales, ya que al separarse los distintos rayos, manifestarán los mismos colores de antes de entrar en la combinación: así como los polvos azules y amarillos bien mezclados parecen verdes a simple vista, aunque

los colores de los corpúsculos de la composición no se transmutaron verdaderamente, sino sólo se mezclaron. Y cuando los vemos con un buen microscopio siguen siendo azules y amarillos entremezclados.

5. Por lo tanto hay dos tipos de color: el original y simple y, el otro, compuesto de estos. Los colores originales o primarios son rojo, amarillo, verde, azul y un violeta-purpúreo, junto con naranja, índigo, y una variedad infinita de gradaciones intermedias.

6. Los mismos colores *in specie* con los primarios pueden también producirse por combinación, pues una mezcla de amarillo y azul hace verde; de rojo y amarillo, da naranja; de naranja y verde amarillento, el amarillo. Y, en general, si se mezclan dos colores que no estén demasiado separados uno del otro en la serie de los generados por el prisma, [3083] componen, debido a su aleación mutua, el color que aparece entre ellos dentro de dicha serie. Pero los que distan demasiado no se comportan así. El naranja y el índigo no producen el verde intermedio, ni escarlata y verde el amarillo intermedio.

7. Pero la combinación más asombrosa y maravillosa fue la del blanco. No hay una clase de rayos que por sí misma lo produzca. Siempre es compuesto, y para componerlo hacen falta todos los colores primarios mencionados, mezclados en la proporción debida. A menudo he visto con asombro que al hacer converger todos los colores del prisma, y así volver a combinarlos tal y como estaban en la luz antes de caer sobre él, se reprodujo una luz entera y perfectamente blanca, sin

ninguna diferencia sensible respecto de la luz directa del sol, salvo que los cristales que empleara no estuviesen suficientemente claros, en cuyo caso se inclinarían un poco hacia su color⁹.

8. Luego, en consecuencia, la blancura es el color normal de la luz; pues la luz es un agregado confuso de rayos de todo tipo de colores que salen de la reflexión promiscua en las distintas partes de los cuerpos luminosos. Y, como dije, tal agregado confuso genera blancura, si existe una proporción adecuada de ingredientes; pero si predomina alguno de ellos, la luz se inclinará hacia este color, como en el caso de la llama azul del azufre, la llama amarilla de una vela, y los diversos colores de las estrellas fijas.

9. Visto todo lo anterior, es evidente cómo se producen los colores a través del prisma. Porque los rayos que constituyen la luz incidente, dado que los que difieren en color difieren proporcionalmente en refrangibilidad, se dividirán según sus respectivas y distintas refracciones, y se distribuirán en forma oblonga según una sucesión ordenada, desde el escarlata menos refractado hasta el violeta más refractado. Y por la misma razón los objetos vistos a través de un prisma parecen coloreados, pues los rayos de cada clase, por su refracción desigual, son obligados a diverger hacia distintos lugares de la retina, donde por ello se forma una imagen coloreada de las cosas, tal y como sucedía en el caso anterior con la imagen del Sol sobre la pared. Y por esta desigualdad de refracciones se hacen no sólo coloreados, sino muy confusos e indistintos.

10. Por eso es también evidente por qué aparecen los colores del arco iris en las gotas de lluvia que caen. [3084] Porque las gotas que refractan los rayos dispuestos a parecer mayoritariamente purpúreos al ojo del espectador, refractan tanto menos los rayos de otro tipo, dejándolos pasar al lado; y así son las gotas en el interior del arco primario y hacia exterior del arco secundario o exterior. Así que las gotas que más refractan hacia el ojo del espectador los rayos dispuestos a parecer rojos, refractan tanto menos los de otro tipo, dejándolos pasar al lado; y así son las gotas de la parte exterior del arco primario y de la parte interior del secundario.

11. Por eso ya no son un misterio los curiosos fenómenos de que una infusión de *lignum nephriticum* [palo dulce]¹⁰, las hojas de oro, los fragmentos de vidrio coloreado, y de otros cuerpos transparentes de color, parezcan tener un color en una posición y otro color en otra. Pues se trata de sustancias dispuestas a reflejar un tipo de luz y a transmitir otro, tal y como se ve en un cuarto oscuro al iluminarlos con luz homogénea o no compuesta. Entonces parecen tener solamente el color con el cual son iluminadas, aunque en una posición estén más vivas y luminosas que en otra, según estén más o menos dispuestos a reflejar o transmitir el color incidente.

12. También de esto se hace evidente la razón de un experimento imprevisto que, en alguna parte de su *Micrography*, el Sr. Hooke cuenta haber hecho con dos recipientes transparentes en forma de cuña, uno lleno de un líquido azul y, el otro, de rojo; a saber, que aun-

que por separado eran bastante transparentes, los dos juntos se hacían opacos, pues si uno solo transmitía el rojo y el otro sólo el azul, ningún rayo podía atravesar ambos.

13. Podría añadir más ejemplos de este estilo, pero concluiré con uno general: que los colores de todos los cuerpos naturales solo deben su origen a que varía su disposición a reflejar mayor cantidad de un tipo de luz que de otra. Y lo he experimentado en un cuarto oscuro, iluminando dichos cuerpos con luz compuesta de varios colores, y así cualquier cuerpo puede parecer de cualquier color. Ahí no tienen color propio, sino que siempre aparecen con el color de la luz que se les echa encima, con la diferencia de que son más brillantes y vivos bajo la luz del color que tienen a la luz del día. El minio adopta cualquier color con el que indistintamente se le ilumine, pero es más luminoso con rojo; asimismo, [3085] la azurita adopta cualquier color con el que indistintamente se le ilumine, pero es más luminoso con el azul. Por lo tanto el minio refleja los rayos de cualquier color, pero más abundantemente los dotados con rojo; por consiguiente al iluminarlo con la luz del día, es decir con rayos de todo tipo mezclados indiferentemente, los rayos dotados de rojo serán más abundantes en la luz reflejada, y por su prevalencia hará que parezca de ese color. Y por el mismo motivo la azurita, que refleja más abundantemente el azul, parecerá azul por el exceso de ese tipo de rayos en su luz reflejada; y así con otros cuerpos. Y de ahí que esta sea la razón completa y adecuada de

sus colores, ya que no tienen la capacidad de cambiar ni alterar el color de ningún tipo de rayo incidente, sino que se ponen indiferentemente del color con el que son iluminados.

Visto lo cual, no se puede discutir sobre si hay colores en la oscuridad, ni sobre si son cualidades de los objetos que vemos, y quizás tampoco si la luz es un cuerpo. Ya que, siendo los colores unos atributos de la luz, y siendo sus rayos su única e inmediata causa, ¿cómo podemos considerar que estos rayos también son atributos? A no ser que un atributo pueda ser el causante y el sostén de otro; lo que es, en efecto, llamarlo sustancia. No reconoceríamos que los cuerpos son sustancias si no fuera por sus atributos sensibles, y al descubrirse que lo principal de éstos se debe a otra cosa, tenemos buenos motivos para creer que ésta también es una sustancia.

Por otra parte, ¿quién hubiera pensado que un atributo fuera un conjunto heterogéneo, como se ha demostrado que es la luz? Pero no fácil determinar con mayor perfección qué es la luz, de qué manera se refracta, y qué modos o acciones produce en nuestra mente la aparición de los colores. Y no voy a mezclar conjeturas con certezas.

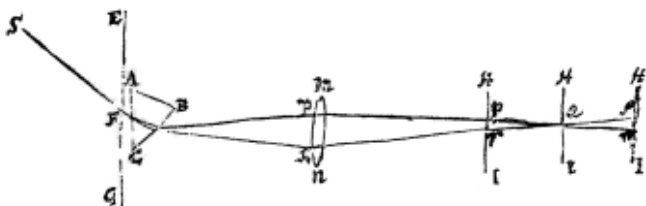
Revisando lo que he escrito, veo que el discurso mismo dará lugar a diversos experimentos adecuados para comprobarlo. Por lo cual, no le entretendré más, salvo para describir uno que ya he sugerido.

En un cuarto oscuro, hágase un agujero en el postigo de la ventana, cuyo diámetro debería ser de aproximadamente un tercio de pulgada [8 mm], para dejar

pasar una cantidad adecuada de luz del Sol. Y colóquese ahí un prisma claro e incoloro, para refractar la luz entrante hacia la parte más lejana del cuarto: la cual, como ya he dicho, se difundirá en una imagen coloreada oblonga. Póngase luego una lente de [3086] un radio de alrededor de tres pies [90 cm]¹¹ (por ejemplo la lente objetiva de un telescopio de tres pies) a una distancia de unos cuatro o cinco pies [1m 20 – 1m 50], a través de la cual se pueden transmitir simultáneamente todos los colores, de forma que por su refracción converjan a una distancia de diez o doce pies [3,00 – 3,60 m] más. Si a esta distancia se intercepta la luz con una hoja de papel blanco, se verá que todos los colores al mezclarse vuelven a convertirse en blanco. Sin embargo es muy importante que el prisma y la lente se mantengan inmóviles, y que el papel sobre el cual se proyectan los colores se mueva hacia delante y hacia atrás: ya que con este movimiento no sólo descubrirá en qué punto la blancura es más perfecta, sino también cómo los colores gradualmente convergen y desaparecen en el blanco; y tras haberse encontrado en el punto donde componen la blancura, se disipan y separan otra vez y presentan en orden inverso los mismos colores que tenían al entrar en la composición. También verá que, si se intercepta en la lente cualquiera de los colores, el blanco virará hacia otros colores. Así que, para que la composición del blanco sea perfecta, hay que tener cuidado con que ninguno de los colores caiga fuera de la lente.

En el dibujo adjunto del experimento, A B C representa el prisma, con la base vuelta hacia el postigo, pró-

ximo al agujero F de la ventana E G. Conviene que el ángulo vertical A C B sea de unos 60 grados: M N indica la lente, de $2\frac{1}{2}$ o 3 pulgadas [65-75 mm] de ancho. S F es una de las líneas rectas en la cual se concibe que los diferentes rayos fluyen sucesivamente desde el sol. F P y F R son dos de esos rayos desigualmente refractados, que la lente hace convergir hacia Q, y tras la intersección vuelven a divergir. Y H I es el papel, a diversas distancias, sobre el cual se proyectan los colores: que en Q forman el blanco, pero son rojo y amarillo en R, r y ρ , y azul y púrpura en P, p, y π . [3087]



Si prosigue para comprobar la imposibilidad de cambiar cualquier color no compuesto (tal y como he afirmado en las proposiciones tres y trece), es necesario hacer que el cuarto esté muy oscuro, para evitar que alguna luz dispersa, al mezclarse con el color, lo afecte y lo debilite, haciéndolo compuesto, en contra del propósito del experimento. También se requiere una separación de los colores más perfecta que la que, según el método anteriormente descrito, puede conseguirse con el uso de un único prisma: no les será difícil conseguir tales separaciones adicionales a quienes que consideren las leyes descubiertas de la refracción.

Pero si se realiza el experimento con colores no perfectamente separados, hay que aceptar cambios proporcionales a la mezcla. Por ejemplo, si la luz amarilla cae sobre la azurita azul, la azurita no parecerá perfectamente amarilla, sino más bien verde, porque en la mezcla amarilla hay muchos rayos que contienen verde; y estando el verde menos lejos del habitual color azul de la azurita que el amarillo, lo refleja con mayor abundancia¹².

Asimismo, si cualquiera de los colores prismáticos, por ejemplo el rojo, se intercepta a fin de comprobar dicha imposibilidad de reproducir este color a partir de los otros que se han dejado pasar, es necesario que los colores estén muy bien separados antes de que el rojo sea interceptado; o que con el rojo se intercepten también los colores colindantes en los cuales se haya filtrado algo de rojo (es decir, el amarillo o incluso el verde); o que se tenga en cuenta que en el amarillo verdoso emergerá la cantidad de rojo que se haya difundido y mezclado de forma dispersa en dichos colores.

Creo que esto es adecuado como introducción a los experimentos de este tipo; y si alguien de la Royal Society tiene suficiente curiosidad como para llevarlos adelante, estaría muy contento de saber con qué resultado, para que si algo resultase imperfecto, o si contradijese este relato, tenga yo la oportunidad de dar más pautas sobre ello o de reconocer mis errores si los he cometido.

Hasta aquí esta docta y muy ingeniosa carta. Habiendo sido muy aplaudida por la Ilustre Compañía

ante la cual se leyó, esta la remitió a algunos de sus socios, muy versados en el asunto. Así que es posible que en un futuro le llegue al lector algún informe que recibamos sobre este discurso.

NOTAS

¹ Esta duplicidad de fechas obedece a la pervivencia en Gran Bretaña del calendario juliano, al que correspondería el primer dígito, mientras en Europa era utilizado el calendario gregoriano. A partir del 25 de marzo el año era común. Esta situación se mantendrá hasta 1752, fecha en que Inglaterra adoptaría el calendario gregoriano.

² Este es un punto fundamental del argumento de Newton. Esta dando por supuesto que si la luz fuese homogénea, su refracción no implicaría una deformación en la proyección.

³ Más pormenorizadamente explicaría en la Óptica (prop. 2,2) la relación entre la longitud del espectro y el ángulo de refracción.

⁴ Celestino Silvea & Martins señalan las dificultades que entrañaba cumplir este requisito en Inglaterra durante el invierno, fecha en que se supone que Newton realiza el experimento, porque el Sol nunca está 44° 56' por encima del horizonte, como requiere el experimento. Es además difícil satisfacer simultáneamente la condición de mantener el prisma en posición de mínima desviación y la de la incidencia normal de los rayos solares debido al movimiento del Sol. Para solucionar estos problemas bastaba con utilizar un espejo que proyectase la luz solar en el punto indicado. También podía sustituirse la pared de proyección por un papel que se moviese, como el propio Newton había sugerido en alguna ocasión. Los cálculos, sin embargo, se hacían más difíciles. Aunque Newton no informa aquí de estas dificultades, quienes intentarán reproducir el experimento deberán enfrentarse a ellas. Cfr. Cibelle Celestino Silva & Roberto de Andrade Martins, «A “Nova Toria sobre Luz e Cores” de Isaac Newton: Uma Tradução Comentada», *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 1996, 18: 4, 313-326.

⁵ El uso del término proviene de la influencia del *Novum Organum* de Francis Bacon, que habla allí de una *instantiaa crucis*. Pero será Hooke en su *Micrographia* (1665) quien utilice la expresión *experimentum crucis* al citar equivocadamente a Bacon. Newton, que había leído a Hooke, lo toma de allí.

⁶ Se refiere a la peste que azotó gran parte de Inglaterra en los años 1665-1667. Como medida precautoria se prohibió toda reunión pública y la universidad cerró sus puertas. Sólo en la primavera de 1697 recobrará la normalidad. Durante

este período Newton se refugió en la casa familiar, en Woolsthorpe. Estos años de soledad serán de los más productivos de su vida: son los años del descubrimiento del cálculo fluxional, de la enunciación de la ley de la gravitación universal y de las primeras formulaciones de su teoría de los colores. (Westfall, p.65ss)

⁷ Es aquí donde Newton refuta las teorías cartesianas sobre los colores. La diferencia entre ellos se establecía debido a que durante la refracción se imprimía a las partículas etéreas que transmitían la luz un movimiento de rotación. Según la velocidad de este movimiento, los colores variarían. En consecuencia, los colores serían un accidente producido por la incidencia sobre un cuerpo sólido. Como bien supo ver Hooke en su réplica a esta carta, faltaba una proposición que debería haber sido la primera: la materialidad corpuscular de la luz. En su respuesta de *Philosophical Transactions of the Royal Society* No. 88, del 18 de noviembre, el matemático dirá que esa es la consecuencia de su teoría, no una suposición fundamental. El asunto requeriría de los más brillantes ingenios de los siglos XVIII y XIX. Sobre las dificultades de verificación experimental de la materialidad de la luz en estos siglos, véase John Worrall, «The Pressure of Light: The Strange Case of the Vacillatin “Crucial Experiment”», *Studies in History and Philosophy of Science*, 1982, 13:2: p. 133-171. Sobre las razones de Newton para rechazar la anterior teoría del color, véase A. I. Sabra, *Theories of Light from Descartes to Newton*, Cambridge University Press, 1981, esp. 319ss

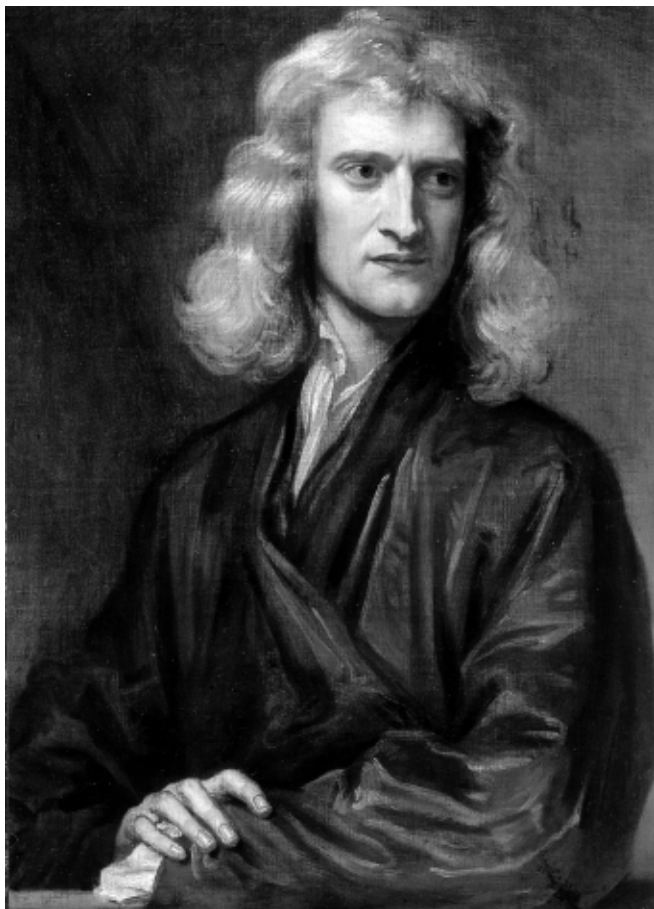
⁸ Por supuesto, el aserto sólo es válido en el caso de que estemos hablando de rayos simples u homogéneos.

⁹ Como señalamos en la introducción, está será una de las proposiciones más problemáticas de la carta. Por lo que respecta a la posición de Huygens sobre la composición de luz blanca a partir del amarillo y el azul espectral, sólo mucho después, en 1852, podrá ser demostrada por Helmholtz. Cf., Alan E. Shapiro, «The Evolving Structure of Newton's Theory of White Light and Color», *Isis*, 1980, 71, p. 211-235, 224.

¹⁰ Se trata de la planta de procedencia mexicana cuyo nombre científico es *Eysenhardtia polystachya*. Las infusiones de esta madera son fluorescentes, a lo cual se le atribuyó una conexión con sus propiedades curativas. También cambia el color entre amarillo y azul, según se oriente la luz.

¹¹ Se trata de una errata. No es posible que entonces se fabricase una lente de un radio de 90 centímetros. Por el comentario que viene a continuación se deduce que está hablando de la distancia focal.

¹² Se muestra aquí por qué la teoría newtoniana resultase tan antiintuitiva. En principio este experimento parecería estar rebatiendo la tesis de Newton, para que no sea así debe admitirse de antemano la existencia de rayos simples y homogéneos.



Sir Godfrey Kneller retrató a Isaac Newton hacia 1689, cuando éste contaba 47 años y se encontraba en la cima de su carrera. Huygens, entonces el científico más famoso de Europa, viajó ese año a Inglaterra para conocerlo personalmente. Tras un corto periodo en la universidad, Newton se incorporará a la casa de la moneda (the Mint), de cuya dirección se hará cargo en 1699. En los años siguientes, hasta su fallecimiento en 1727, este hijo ilustre de un granjero, eminente teólogo y científico, recibirá todos los honores de sus coetáneos.

PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS.

February 19. 1672.

☞

The CONTENTS.

A Letter of Mr. Isaac Newton, Mathematick Professor in the University of Cambridge; containing his New Theory about Light and Colors: Where Light is declared to be not Similar or Homogeneous, but consisting of differray, some of which are more refrangible than others: And Colors are affirm'd to be not Qualifications of Light, deriv'd from Refractions of natural Bodies, (as 'tis generally believed;) but Original and Connate properties, which in divers rays are divers: Where several Observations and Experiments are alledged to prove the said Theory. An Account of some Books: I. A Description of the EAST-INDIAN COASTS, MALABAR, COROMANDEL, CEYLON, &c. in Dutch, by Phil. Baldæus. II. Antonii le Grand INSTITUTIO PHILOSOPHIÆ, secundum principia Renati Des-Cartes; novâ methodo adornata & explicata. III. An Essay to the Advancement of MUSICK; by Thomas Salmon M.A. Advertisement about Thæon Smyrnæus. An Index for the Traills of the Year 1671.

A Letter of Mr. Isaac Newton, Professor of the Mathematicks in the University of Cambridge; containing his New Theory about Light and Colors: sent by the Author to the Publisher from Cambridge, Febr. 6. 1672; in order to be communicated to the R. Society.

S I R,

TO perform my late promise to you, I shall without further ceremony acquaint you, that in the beginning of the Year 1666 (at which time I applyed my self to the grinding of Optick glasses of other figures than *Spherical*;) I procured me a Triangular glass-Prisme, to try therewith the celebrated *Phænomena* of Colours.

G g g g

Colours. And in order thereto having darkened my chamber, and made a small hole in my window-shuts, to let in a convenient quantity of the Suns light, I placed my *Prisme* at his entrance, that it might be thereby refracted to the opposite wall. It was at first a very pleasing divertisement, to view the vivid and intense colours produced thereby; but after a while applying my self to consider them more circumspcctly, I became surpris'd to see them in an *oblong* form; which, according to the received laws of Refraction, I expected should have been *circular*.

They were terminated at the sides with streight lines, but at the ends, the decay of light was so gradual, that it was difficult to determine justly, what was their figure; yet they seem'd *semicircular*.

Comparing the length of this coloured *Spectrum* with its breadth, I found it about five times greater; a disproportion so extravagant, that it excited me to a more then ordinary curiosity of examining, from whence it might proceed. I could scarce think, that the various *Thickness* of the glass, or the termination with shadow or darkness, could have any Influence on light to produce such an effect; yet I thought it not amiss, first to examine those circumstances, and so tryed, what would happen by transmitting light through parts of the glass of divers thicknesses, or through holes in the window of divers bignesses, or by setting the *Prisme* without so, that the light might pass through it, and be refracted before it was terminated by the hole: But I found none of those circumstances material. The fashion of the colours was in all these cases the same.

Then I suspected, whether by any *unevenness* in the glass, or other contingent irregularity, these colours might be thus dilated. And to try this, I took another *Prisme* like the former, and so placed it, that the light, passing through them both, might be refracted contrary ways, and so by the latter returned into that course, from which the former had diverted it. For, by this means I thought, the *regular* effects of the first *Prisme* would be destroyed by the second *Prisme*, but the *irregular* ones more augmented, by the multiplicity of refractions. The event was, that the light, which by the first *Prisme* was diffus'd into an *oblong* form, was by the second reduced into an *orbicular* one with as much regularity, as when it did not at all pass through them. So that, what ever was the cause of that length, 'twas not any contingent irregularity.

I then proceeded to examin more critically, what might be effected by the difference of the incidence of Rays coming from divers parts of the Sun : and to that end, measured the several lines and angles, belonging to the Image. Its distance from the hole or Prism was 22 foot ; its utmost length $13\frac{1}{2}$ inches ; its breadth $2\frac{1}{4}$; the diameter of the hole $\frac{1}{4}$ of an inch ; the angle, with the Rays, tending towards the middle of the image, made with those lines, in which they would have proceeded without refraction, was 44 deg. 56'. And the vertical Angle of the Prism, 63 deg. 12'. Also the Refractions on both sides the Prism, that is, of the Incident, and Emergent Rays, were as near, as I could make them, equal, and consequently about 54 deg. 4'. And the Rays fell perpendicularly upon the wall. Now subducting the diameter of the hole from the length and breadth of the Image, there remains 13 Inches the length, and $2\frac{1}{4}$ the breadth, comprehended by those Rays, which passed through the center of the said hole, and consequently the angle of the hole, which that breadth subtended, was about 31', answerable to the Sun's Diameter ; but the angle, which its length subtended, was more then five such diameters, namely 2 deg. 49'.

Having made these observations, I first computed from them the refractive power of that glass, and found it measured by the *ratio* of the sines, 20 to 31. And then, by that *ratio*, I computed the Refractions of two Rays flowing from opposite parts of the Sun's *discus*, so as to differ 31' in their obliquity of Incidence, and found, that the emergent Rays should have comprehended an angle of about 31', as they did, before they were incident.

But because this computation was founded on the Hypothesis of the proportionality of the *sines* of Incidence, and Refraction, which though by my own Experience I could not imagine to be so erroneous, as to make that Angle but 31', which in reality was 2 deg. 49' ; yet my curiosity caused me again to take my Prism. And having placed it at my window, as before, I observed, that by turning it a little about its *axis* to and fro, so as to vary its obliquity to the light, more then an angle of 4 or 5 degrees, the Colours were not thereby sensibly translated from their place on the wall, and consequently by that variation of Incidence, the quantity of Refraction was not sensibly varied. By this Experiment therefore, as well as by the former computation, it was evident, that the difference of the Incidence of Rays, flowing from divers

Gggg 2 parts

parts of the Sun, could not make them after decussation diverge at a sensibly greater angle, than that at which they before converged; which being, at most, but about 31 or 32 minutes, there still remained some other cause to be found out, from whence it could be 2 degr. 49'.

Then I began to suspect, whether the Rays, after their trajectory through the Prisme, did not move in curve lines, and according to their more or less curvity tend to divers parts of the wall. And it increased my suspicion, when I remembered that I had often seen a Tennis-ball, struck with an oblique Racket, describe such a curve line. For, a circular as well as a progressive motion being communicated to it by that stroke, its parts on that side, where the motions conspire, must press and beat the contiguous Air more violently than on the other, and there excite a reluctance and reaction of the Air proportionably greater. And for the same reason, if the Rays of light should possibly be globular bodies, and by their oblique passage out of one medium into another acquire a circulating motion, they ought to feel the greater resistance from the ambient Æther, on that side, where the motions conspire, and thence be continually bowed to the other. But notwithstanding this plausible ground of suspicion, when I came to examine it, I could observe no such curvity in them. And besides (which was enough for my purpose) I observed, that the difference 'twixt the length of the Image, and diameter of the hole, through which the light was transmitted, was proportionable to their distance.

The gradual removal of these suspicions, at length led me to the *Experimentum Crucis*, which was this: I took two boards, and placed one of them close behind the Prisme at the window, so that the light might pass through a small hole, made in it for the purpose, and fall on the other board, which I placed at about 12 feet distance, having first made a small hole in it also, for some of that Incident light to pass through. Then I placed another prisme behind this second board, so that the light, trajected through both the boards, might pass through that also, and be again refracted before it arrived at the wall. This done, I took the first Prisme in my hand, and turned it to and fro slowly about its *Axis*, so much as to make the several parts of the Image, cast on the second board, successively pass through the hole in it, that I might observe to what places on the wall the second Prisme would refract them.

And

And I saw by the variation of those places, that the light, tending to that end of the Image, towards which the refraction of the first Prisme was made, did in the second Prisme suffer a Refraction considerably greater then the light tending to the other end. And so the true cause of the length of that Image was detected to be no other, then that *Light* consists of *Rays differently refrangible*, which, without any respect to a difference in their incidence, were, according to their degrees of refrangibility, transmitted towards divers parts of the wall.

When I understood this, I left off my aforelaid Glass works; for I saw, that the perfection of Telescopes was hitherto limited, not so much for want of glasses truly figured according to the prescriptions of Optick Authors, (which all men have hitherto imagined,) as because that Light it self is a *Heterogeneous mixture of differently refrangible Rays*. So that, were a glass so exactly figured, as to collect any one sort of rays into one point, it could not collect those also into the same point, which having the same Incidence upon the same Medium are apt to suffer a different refraction. Nay, I wondered, that seeing the difference of refrangibility was so great, as I found it, Telescopes should arrive to that perfection they are now at. For, measuring the refractions in one of my Prismes, I found, that supposing the common *sine* of Incidence upon one of its planes was 44 parts, the *sine* of refraction of the utmost Rays on the red end of the Colours, made out of the glass into the Air, would be 68 parts, and the *sine* of refraction of the utmost rays on the other end, 69 parts: So that the difference is about a 24th or 25th part of the whole refraction. And consequently, the object-glass of any Telescope cannot collect all the rays, which come from one point of an object, so as to make them convene at its *focus* in less room then in a circular space, whose diameter is the 50th part of the Diameter of its Aperture; which is an irregularity, some hundreds of times greater, then a circularly figured *Lens*, of so small a section as the Object-glasses of long Telescopes are, would cause by the unsuitness of its figure, were Light *uniform*.

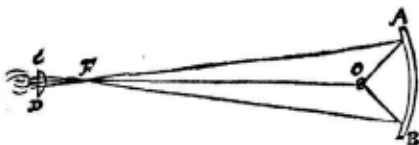
This made me take *Reflections* into consideration, and finding them regular, so that the Angle of Reflection of all sorts of Rays was equal to their Angle of Incidence; I understood, that by their mediation Optick instruments might be brought to any degree of perfection imaginable, provided a *Reflecting* substance could be found,

found, which would polish as finely as Glass, and *reflect* as much light, as glass *transmits*, and the art of communicating to it a *Parabolick* figure be also attained. But there seemed very great difficulties, and I have almost thought them insuperable, when I further considered, that every irregularity in a reflecting superficies makes the rays stray 5 or 6 times more out of their due course, than the like irregularities in a refracting one : So that a much greater curiosity would be here requisite, than in figuring glasses for Refraction.

Amidst these thoughts I was forced from *Cambridge* by the Intervening Plague, and it was more then two years, before I proceeded further. But then having thought on a tender way of polishing, proper for metall, whereby, as I imagined, the figure also would be corrected to the last ; I began to try, what might be effected in this kind, and by degrees so far perfected an Instrument (in the essential parts of it like that I sent to *London*,) by which I could discern Jupiters 4 Concomitants, and shewed them divers times to two others of my acquaintance. I could also discern the Moon-like phase of *Venus*, but not very distinctly, nor without some niceness in disposing the Instrument.

From that time I was interrupted till this last Autumn, when I made the other. And as that was sensibly better then the first (especially for Day-Objects,) so I doubt not, but they will be still brought to a much greater perfection by their endeavours, who, as you inform me, are taking care about it at *London*.

I have sometimes thought to make a *Microscope*, which in like manner should have, instead of an Object-glass, a Reflecting piece of metall. And this I hope they will also take into consideration, For those Instruments seem as capable of improvement as *Telescopes*, and perhaps more, because but one reflective piece of metall is requisite in them, as you may perceive by the annexed diagram, where A B representeth the object metall, C D the eye glass, F their common Focus, and O the other focus of the metall, in which the object is placed.



But

But to return from this digression, I told you, that Light is *not* similar, or homogeneous, but consists of *difform* Rays, some of which are more refrangible than others : So that of those, which are alike incident on the same medium, some shall be more refracted than others, and that not by any virtue of the glass, or other external cause, but from a predisposition, which every particular Ray hath to suffer a particular degree of Refraction.

I shall now proceed to acquaint you with another more notable difformity in its Rays, wherein the *Origin of Colours* is unfolded : Concerning which I shall lay down the *Doctrine* first, and then, for its examination, give you an instance or two of the *Experiments*, as a specimen of the rest.

The Doctrine you will find comprehended and illustrated in the following propositions.

1. As the Rays of light differ in degrees of Refrangibility, so they also differ in their disposition to exhibit this or that particular colour. Colours are not *Qualifications of Light*, derived from Refractions, or Reflections of natural Bodies (as 'tis generally believed,) but *Original* and *connate properties*, which in divers Rays are divers. Some Rays are disposed to exhibit a red colour and no other; some a yellow and no other, some a green and no other, and so of the rest. Nor are there only Rays proper and particular to the more eminent colours, but even to all their intermediate gradations.

2. To the same degree of Refrangibility ever belongs the same colour; and to the same colour ever belongs the same degree of Refrangibility. The *least Refrangible* Rays are all disposed to exhibit a *Red* colour, and contrarily those Rays, which are disposed to exhibit a *Red* colour, are all the least refrangible : So the *most refrangible* Rays are all disposed to exhibit a deep *Violet* Colour, and contrarily those which are apt to exhibit such a violet colour, are all the most Refrangible. And so to all the intermediate colours in a continued series belong intermediate degrees of refrangibility. And this Analogy 'twixt colours, and refrangibility, is very precise and strict; the Rays always either exactly agreeing in both, or proportionally disagreeing in both.

3. The species of colour, and degree of Refrangibility proper to any particular sort of Rays, is not mutable by Refraction, nor by Reflection from natural bodies, nor by any other cause, that I could yet observe. When any one sort of Rays hath been well parted

parted from those of other kinds, it hath afterwards obstinately retained its colour, notwithstanding my utmost endeavours to change it. I have refracted it with Prismes, and reflected it with Bodies, which in Day-light were of other colours; I have intercepted it with the coloured film of Air interceding two compressed plates of glass; transmitted it through coloured Mediums, and through Mediums irradiated with other sorts of Rays, and diversly terminated it; and yet could never produce any new colour out of it. It would by contracting or dilating become more brisk, or faint, and by the loss of many Rays, in some cases very obscure and dark; but I could never see it changed *in specie*.

Yet seeming transmutations of Colours may be made, where there is any mixture of divers sorts of Rays. For in such mixtures, the component colours appear not, but, by their mutual allaying each other, constitute a midling colour. And therefore, if by refraction, or any other of the aforesaid causes, the difform Rays, latent in such a mixture, be separated, there shall emerge colours different from the colour of the composition. Which colours are not New generated, but only made Apparent by being parted; for if they be again intirely mix't and blended together, they will again compose that colour, which they did before separation. And for the same reason, Transmutations made by the convening of divers colours are not real; for when the difform Rays are again severed, they will exhibit the very same colours, which they did before they entered the composition: as you see, *Blow* and *Yellow* powders, when finely mixed, appear to the naked eye *Green*, and yet the Colours of the Component corpuscles are not thereby really transmuted, but only blended. For, when viewed with a good Microscope, they still appear *Blow* and *Yellow* interspersedly.

5. There are therefore two sorts of Colours. The one original and simple, the other compounded of these. The Original or primary colours are, *Red*, *Yellow*, *Green*, *Blow*, and a *Violet-purple*, together with *Orange*, *Indico*, and an indefinite variety of Intermediate gradations.

6. The same colours in *specie* with these Primary ones may be also produced by composition: For, a mixture of *Yellow* and *Blow* makes *Green*; of *Red* and *Yellow* makes *Orange*; of *Orange* and *Yellowish green* makes *yellow*. And in general, if any two Colours be mixed, which in the series of those, generated by the Prism, are
not

not too far distant one from another, they by their mutual alloy compound that colour, which in the said series appeareth in the mid-way between them. But those, which are situated at too great a distance, do not so. *Orange* and *Indico* produce not the intermediate Green, nor Scarlet and Green the intermediate yellow.

7. But the most surprising, and wonderful composition was that of *Whiteness*. There is no one sort of Rays which alone can exhibit this. 'Tis ever compounded, and to its composition are requisite all the aforesaid primary Colours, mixed in a due proportion. I have often with Admiration beheld, that all the Colours of the Prisme being made to converge, and thereby to be again mixed as they were in the light before it was Incident upon the Prisme, reproduced light, intirely and perfectly white, and not at all sensibly differing from a *direct* Light of the Sun, unless when the glasses, I used, were not sufficiently clear; for then they would a little incline it to *their* colour.

8. Hence therefore it comes to pass, that *Whiteness* is the usual colour of *Light*; for, Light is a confused aggregate of Rays indued with all sorts of Colours, as they are promiscuously darted from the various parts of luminous bodies. And of such a confused aggregate, as I said, is generated *Whiteness*, if there be a due proportion of the Ingredients; but if any one predominate, the Light must incline to that colour; as it happens in the Blew flame of Brimstone; the yellow flame of a Candle; and the various colours of the Fixed stars.

9. These things considered, the *manner*, how colours are produced by the Prisme, is evident. For, of the Rays, constituting the incident light, since those which differ in Colour proportionally differ in Refrangibility, they by their unequal refractions must be severed and dispersed into an oblong form in an orderly succession from the least refracted Scarlet to the most refracted Violet. And for the same reason it is, that objects, when looked upon through a Prisme, appear coloured. For, the difform Rays, by their unequal Refractions, are made to diverge towards several parts of the *Retina*, and there express the Images of things coloured, as in the former case they did the Sun's Image upon a wall. And by this inequality of refractions they become not only coloured, but also very confused and indistinct.

10. Why the Colours of the *Rainbow* appear in falling drops
H h h h of

of Rain, is also from hence evident. For, those drops, which refract the Rays, disposed to appear purple, in greatest quantity to the Spectators eye, refract the Rays of other sorts so much less, as to make them pass beside it; and such are the drops on the inside of the *Primary* Bow, and on the outside of the *Secondary* or Exterior one. So those drops, which refract in greatest plenty the Rays, apt to appear red, toward the Spectators eye, refract those of other sorts so much more, as to make them pass beside it; and such are the drops on the exterior part of the *Primary*, and interior part of the *Secondary* Bow.

11. The odd Phenomena of an infusion of *Lignum Nephriticum*, *Leaf gold*, *Fragments of coloured glass*, and some other transparently coloured bodies, appearing in one position of one colour, and of another in another, are on these grounds no longer riddles. For, those are substances apt to reflect one sort of light and transmit another; as may be seen in a dark room, by illuminating them with similar or uncompounded light. For, then they appear of that colour only, with which they are illuminated, but yet in one position more vivid and luminous than in another, accordingly as they are disposed more or less to reflect or transmit the incident colour.

12. From hence also is manifest the reason of an unexpected Experiment, which Mr. *Hook* somewhere in his *Micrography* relates to have made with two wedg-like transparent vessels, fill'd the one with a red, the other with a blew liquor: namely, that though they were severally transparent enough, yet both together became opaque; For, if one transmitted only red, and the other only blew, no rays could pass through both.

13. I might add more instances of this nature, but I shall conclude with this general one, that the Colours of all natural Bodies have no other origin than this, that they are variously qualified to reflect one sort of light in greater plenty than another. And this I have experimented in a dark Room by illuminating those bodies with uncompounded light of divers colours. For by that means any body may be made to appear of any colour. They have there no appropriate colour, but ever appear of the colour of the light cast upon them, but yet with this difference, that they are most brisk and vivid in the light of their own daylight-colour. *Minium* appeareth there of any colour indifferently, with which 'tis illustrated, but yet most luminous in red, and so

Bf:

Bife appeareth indifferently of any colour with which 'tis illustrated, but yet most luminous in blew. And therefore *Minium* reflecteth Rays of any colour, but most copiously those indued with red; and consequently when illustrated with day-light, that is, with all sorts of Rays promiscuously blended, those qualified with red shall abound most in the reflected light, and by their prevalence cause it to appear of that colour. And for the same reason *Bife*, reflecting blew most copiously, shall appear blew by the excess of those Rays in its reflected light; and the like of other bodies. And that this is the intire and adequate cause of their colours, is manifest, because they have no power to change or alter the colours of any sort of Rays incident apart, but put on all colours indifferently, with which they are inlightned.

These things being so, it can be no longer disputed, whether there be colours in the dark, nor whether they be the qualities of the objects we see, no nor perhaps, whether Light be a Body. For, since Colours are the *qualities* of Light, having its Rays for their intire and immediate subject, how can we think those Rays *qualities* also, unless one quality may be the subject of and sustain another: which in effect is to call it *Substance*. We should not know Bodies for substances, were it not for their sensible qualities, and the Principal of those being now found due to something else, we have as good reason to believe that to be a Substance also.

Besides, whoever thought any quality to be a *heterogeneous* aggregate, such as Light is discovered to be. But, to determine more absolutely, what Light is, after what manner refracted, and by what modes or actions it produceth in our minds the Phantasms of Colours, is not so easie. And I shall not mingle conjectures with certainties.

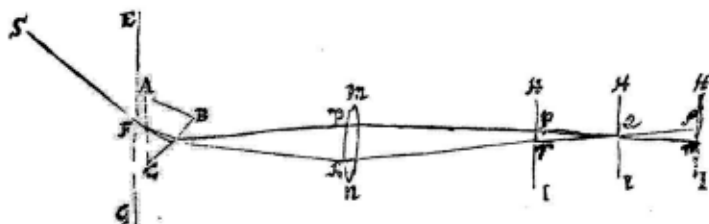
Reviewing what I have written, I see the discourse it self will lead to divers Experiments sufficient for its examination: And therefore I shall not trouble you further, than to describe one of those, which I have already insinuated.

In a darkened Room make a hole in the shut of a window, whose diameter may conveniently be about a third part of an inch, to admit a convenient quantity of the Suns light: And there place a clear and colourless Prisme, to refract the entring light towards the further part of the Room, which, as I said, will thereby be diffused into an oblong coloured Image. Then place a *Lens* of

H h h h 2 about

about three foot radius (suppose a broad Object-glass of a three foot Telescope,) at the distance of about four or five foot from thence, through which all those colours may at once be transmitted, and made by its Refraction to convene at a further distance of about ten or twelve feet. If at that distance you intercept this light with a sheet of white paper, you will see the colours converted into whiteness again by being mingled. But it is requisite, that the *Prisme* and *Lens* be placed steddy, and that the paper, on which the colours are cast, be moved to and fro; for, by such motion, you will not only find, at what distance the whiteness is most perfect, but also see, how the colours gradually convene, and vanish into whiteness, and afterwards having crossed one another in that place where they compound Whiteness, are again dissipated, and severd, and in an inverted order retain the same colours, which they had before they entered the composition. You may also see, that, if any of the Colours at the *Lens* be intercepted, the Whiteness will be changed into the other colours. And therefore, that the composition of whiteness be perfect, care must be taken, that none of the colours fall besides the *Lens*.

In the annexed design of this Experiment, *ABC* expresseth the *Prism* set endwise to light, close by the hole *F* of the window



E. G. Its vertical Angle *ACB* may conveniently be about 60 degrees: *MN* designeth the *Lens*. Its breadth $2\frac{1}{2}$ or 3 inches. *SF* one of the streight lines, in which difform Rays may be conceived to flow successively from the Sun. *FP*, and *FR* two of those Rays unequally refracted, which the *Lens* makes to converge towards *Q*, and after decussation to diverge again. And *HI* the paper, at divers distances, on which the colours are projected: which in *Q* constitute *Whiteness*, but are *Red* and *Yellow* in *R*, *r*, and *s*, and *Blue* and *Purple* in *P*, *p*, and *π*.

If you proceed further to try the impossibility of changing any uncompound colour (which I have asserted in the third and thirteenth Propositions,) 'tis requisite that the Room be made very dark, least any scattering light, mixing with the colour, disturb and allay it, and render it compound, contrary to the design of the Experiment. 'Tis also requisite, that there be a perfecter separation of the Colours, than, after the manner above described, can be made by the Refraction of one single Prisme, and how to make such further separations, will scarce be difficult to them, that consider the discovered laws of Refractions. But if tryal shall be made with colours not thoroughly separated, there must be allowed changes proportionable to the mixture. Thus if compound Yellow light fall upon Blew *Bise*, the *Bise* will not appear perfectly yellow, but rather green, because there are in the yellow mixture many rays indued with green, and Green being less remote from the usual blew colour of *Bise* than yellow, is the more copiously reflected by it.

In like manner, if any one of the Prismatick colours, suppose Red, be intercepted, on design to try the asserted impossibility of reproducing that Colour out of the others which are pretermitted; 'tis necessary, either that the colours be very well parted before the red be intercepted, or that together with the red the neighbouring colours, into which any red is secretly dispersed, (that is, the yellow, and perhaps green too) be intercepted; or else, that allowance be made for the emerging of so much red out of the yellow green, as may possibly have been diffused, and scatteringly blended in those colours. And if these things be observed, the new Production of Red, or any intercepted colour will be found impossible.

This, I conceive, is enough for an Introduction to Experiments of this kind; which if any of the *R. Society* shall be so curious as to prosecute, I should be very glad to be informed with what success: That, if any thing seem to be defective, or to thwart this relation, I may have an opportunity of giving further direction about it, or of acknowledging my errors, if I have committed any.

So far this Learned and very Ingenious Letter; which having been by that *Illustrious Company*, before whom it was read, with much applause committed to the consideration of some of their Fellows, well versed in this argument, the Reader may possibly in an other *Treat* be informed of some report given in upon this Discourse.

A.

EL NUEVO TELESCOPIO
CATADIÓPTRICO

NOTA

El siguiente texto es una traducción del inglés de *Philosophical Transactions of the Royal Society*, nº 81, 25 de marzo de 1672, pp. 4004-10. La numeración roja entre corchetes corresponde a la paginación del original, y las notas a la traducción van al final de la misma.

DESCRIPCIÓN DEL NUEVO TELESCOPIO CATA-
DIÓPTRICO INVENTADO POR EL SR. NEW-
TON, MIEMBRO DE LA ROYAL SOCIETY Y PRO-
FESOR DE MATEMÁTICAS EN LA UNIVERSIDAD DE
CAMBRIDGE

Habiéndonos ya informado este excelente matemático en las *Transactions* del pasado febrero del motivo que le indujo a pensar en los telescopios de reflexión en vez de en los de refracción, se presenta ahora ante los Curiosos con un trabajo sobre lo que puede conseguirse con tales telescopios, demostrando que el tubo del telescopio puede acortarse bastante sin que disminuya su capacidad de aumento.

El nuevo instrumento consta de dos espejos metálicos¹, uno cóncavo (en vez de un objetivo) y el otro plano, además de un pequeño ocular plano-convexo.

La Figura 1 permite imaginar sin problema su estructura: esto es, que el tubo del telescopio está abierto en el extremo que da al objeto, que el otro, allí donde se encuentra el mencionado espejo cóncavo, está cerrado; y que próximo al extremo abierto hay un espejo secundario plano y ovalado, tan pequeño como sea posible para que no obstruya el paso de los rayos de luz, además de inclinado hacia la parte superior del tubo, donde hay un pequeño orificio para acceder al citado ocular. Así, los rayos procedentes del objeto inciden primero en el espejo cóncavo situado al fondo del tubo, donde se reflejan hasta el otro extremo para inci-

dir sobre el espejo plano, colocado oblicuamente, y entonces dirigirse hacia el pequeño ocular plano-convexo y en consecuencia al ojo del espectador, quien mirando hacia abajo ve el objeto al que apunta el telescopio.

Para entenderlo más clara y plenamente, el lector puede mirar la dicha Figura, en la que:

AB es el espejo cóncavo, con un radio o semidiámetro de 12 o 13 pulgadas [32-33 cm]².

CD es otro espejo metalino, plano y de forma ovalada. [4005]

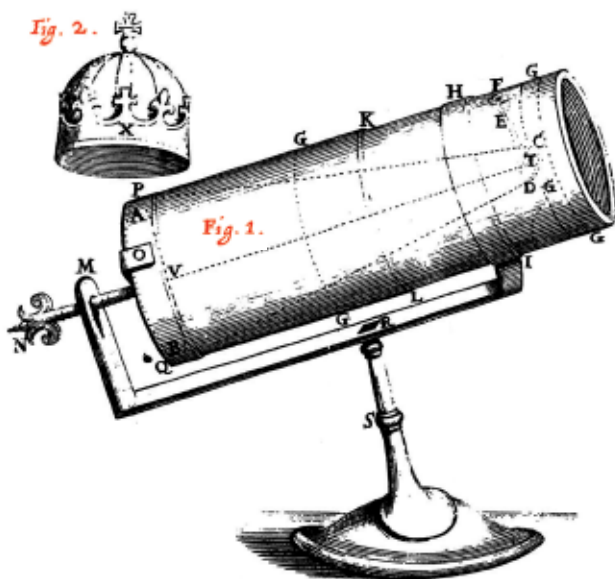
GD es un alambre de hierro que sujeta un arete de latón y al que se fija el espejo CD.

F es un pequeño ocular, plano por arriba y convexo por debajo, cuyo radio mide un doceavo de pulgada, [2mm], o menos; y como el metal recoge los rayos del sol a una distancia de $6\frac{2}{3}$ pulgadas [17 cm], y el ocular a menos de $\frac{1}{6}$ de pulgada [4 mm] desde el vértice. Y como, además, el autor (según nos cuenta) supo las dimensiones por los instrumentos usados para su esmerilado y, en particular, midiendo el molde cóncavo hemisférico con el que se hizo el ocular, descubrió que medía un sexto de pulgada.

GGG es la parte anterior del tubo, sujeto con un aro de latón HI para mantenerla inamovible.

PQKL, la parte posterior del tubo, sujeta con otro aro de latón PQ.

O, es un soporte sujeto al aro PQ, provisto de un tornillo N que mueve hacia delante o hacia atrás la parte posterior del tubo, a fin de poder colocar los espejos a la distancia adecuada.



MQGI es una pieza doblada de hierro que sostiene el tubo, sujeta por la clavija R a la junta articulada S, con la que se puede girar el tubo en todos los sentidos.

El centro del espejo plano CD debe colocarse en el punto mismo del eje del tubo en donde cae la perpendicular al eje, trazada desde el centro del pequeño ocular. Dicho punto está marcado con T.

Y para que el lector tenga la satisfacción de comprender hasta qué punto se ven las cosas claras, sin los efectos del color, y de conocer el tamaño de la abertura por la que entra la luz, puede comparar las distancias del foco E desde los vértices del pequeño ocular y del espejo cóncavo: esto es, EF, un $\frac{1}{6}$ de pulgada y ETV,

6 1/3 pulgadas. La razón es de 1 a 38, de donde los objetos aumentarán unas de 38 veces³. Esta proporción se demuestra fácilmente con una observación de la corona que remata las la veletas, distante unos 300 pies [90 m]. El dibujo X en la Fig. 2 la muestra con un diámetro 2 1/2 veces más grande al verla [4006] con el telescopio, en lugar de con uno normal de unos 2 pies [60 cm] de largo. Y si suponemos que el telescopio normal aumenta unas 13 o 14 veces (como se colige de la descripción), el nuevo que usamos en el experimento debe aumentar más o menos en la proporción que le hemos atribuido.

Hasta aquí la estructura del telescopio. Respecto de la metalina empleada en estos espejos reflectores, el Inventor también la ha estudiado, lo que demuestra en dos cartas que a tal fin fueron enviadas al Editor desde Cambridge los días 18 y 29 de enero de 1671/72. Veámoslo.

1. Respecto a la sustancia metalina elegida, daría la Advertencia de que cuando busquemos un compuesto metalino blanco, duro y duradero, no elijamos uno de los que están llenos de esos pequeños poros que sólo son visibles con un microscopio⁴. Pues, aunque tal sustancia aparente poder pulirse bien, los bordes de los mencionados pequeños poros pulidos, sin embargo, se desgastan más rápido que las otras partes del metal; y así, por más pulido que parezca, el metal no reflejará con la precisa regularidad que se necesita. El bismuto, por ejemplo, mezclado con el metal campanil normal lo vuelve más blanco y apto para reflejar

mayor cantidad de luz, pero los vapores provocados por la fusión, al igual que las burbujas de aire, dejan el metal repleto de los citados poros microscópicos. En cambio, el arsénico blanco no sólo blanquea el metal sino que lo hace sólido y sin poros, sobre todo si la fusión no fue demasiado violenta. Merece la pena prestar atención al efecto del *Regulus metálico*⁵ (que a veces he utilizado), así como al de otras sustancias parecidas.

Comenta además, para mayor abundamiento, que si el polvo de óxido de estaño que se utiliza para pulir (u otro parecido) no es muy fino, rayará el metal que se pule debido a las aristas de las partículas que lo componen, dejándolo repleto de las mencionadas pequeñas mellas. Por lo que antes de tomar ninguna decisión, hay que considerar si el metal es muy poroso o no.

2. Dice también que no ha ensayado con muchas proporciones de arsénico y de metal y que, por tanto, no puede asegurar cuál es la mejor de todas. Sin embargo, piensa que es preferible usar [4007] una cantidad de arsénico que pese entre la sexta y la octava parte del cobre, pues una proporción mayor hace al metal quebradizo.

El procedimiento seguido por el autor, fue el siguiente: primero fundió el cobre, luego le añadió el arsénico y, una vez fundido éste, los revolvió un poco, teniendo mucho cuidado en no inhalar los vapores nocivos. Después echó el estaño y, en cuanto se hubo fundido (lo que sucedió súbitamente), los mezcló bien y en seguida los decantó.

Dice que no sabe si por dejarlos más tiempo en el fuego una vez fundido el estaño, el metal se habría hecho más poroso debido a una fusión más intensa. No obstante, cree que adoptó el procedimiento más seguro.

Añade que en el metal que envió a Londres no había arsénico, sino una pequeña proporción de plata; recuerda que se trataba de un *shilling* [17 g] por cada tres onzas de metal⁶. Por otra parte, considera que la desventaja de que la plata ablande el metal, haciéndolo poco apto para el pulido, se compensa por la ventaja de volverlo blanco y brillante.

En otro momento mezcló una onza de arsénico, seis de cobre y dos de estaño, contándonos que un amigo suyo le sacó más brillo a dicha aleación de lo que él mismo logró con la otra⁷.

En cuanto a la objeción de que con este tipo de instrumentos resulta difícil encontrar los objetos, contesta en otra carta al editor del 6 de enero de 1671/72, que es el inconveniente de todos los tubos de gran aumento; y que este inconveniente disminuirá con la experiencia, siendo así que él mismo podía encontrar con facilidad los objetos de día con sólo conocer la ubicación relativa a otros objetos que ocasionalmente pudieran verse con el instrumento; de noche, sin embargo, reconoce que encontrar las estrellas es más problemático. Opina, no obstante, que esto puede remediarse fácilmente fijando dos miras a la barra de hierro que sujeta el tubo o mediante un ocular normal montado en la misma armadura que el tubo y dirigido al

mismo objeto, tal y como lo describió Descartes en su *Dióptrica* para corregir el mismo problema en sus mejores telescopios⁸. [4008]

Hasta aquí las cartas del Inventor relativas al instrumento. Al comunicarle la descripción al Señor Christian Hugens (*sic*) de Zulichem, recibimos la siguiente respuesta suya en carta del 16 de febrero 1672:

Veo por la descripción que Vd. me envió del admirable telescopio del Sr. Newton que examinó a fondo la ventaja de usar un espejo cóncavo para atrapar rayos paralelos respecto a las lentes convexas; una ventaja que según mis cálculos es muy grande. De ahí que se pueda poner una apertura mucho más grande con el espejo que cuando hay una lente de la misma distancia focal y que, en consecuencia, pueda aumentar mucho más los objetos que con un telescopio normal. Además así evita el inconveniente, inseparable de las lentes convexas que, debido a la oblicuidad de sus dos superficies, vicia la refracción del los rayos que pasan cerca del borde del lente y produce un efecto más dañino de lo que piensa la gente. Por otra parte, en la reflexión simple en el espejo metalino no se pierden tantos rayos como en unas lentes, que reflejan gran parte de ellos desde sus dos superficies, interceptando además muchos de ellos por mor de las impurezas de su materia.

Así, el principal reto será encontrar un material para el espejo que puede pulirse tan bien y tan uniformemente como los lentes, y un procedimiento para darles el brillo que no corrompa la forma esférica. Hasta

ahora no he encontrado ningún espejo que tuviera un brillo tan bueno como el cristal; y si el Sr. Newton no ha descubierto la manera de mejorarlo, entiendo que sus telescopios no podrán distinguir los objetos tan bien como los que tienen lentes. Pero vale la pena buscar un remedio para este inconveniente, y no pierdo la esperanza de encontrarlo. Creo que el Sr. Newton no habrá dejado de considerar la ventaja que para su instrumento tendría un espejo parabólico respecto de uno esférico aunque, como me pasa a mí, desespera de trabajar con la debida exactitud sobre figuras no esféricas; por otra parte, sería más fácil hacer un espejo parabólico que uno elipsoide o hiperbólico, a causa de una propiedad de la parábola cónica, [4009] a saber, que todas las secciones paralelas al eje pertenecen a la misma parábola.

Hasta aquí la juiciosa carta del Sr. Huygens; en cuanto a la última parte, la relativa al esmerilado de los conoides parabólicos, el Sr. Newton responde en su carta al editor del 20 de febrero de 1671 que, aunque tampoco tiene mucha esperanza de realizar dicho trabajo según reglas geométricas, no duda que pueda en buena medida lograrse con herramientas mecánicas

A todo esto, he de añadir un extracto de una carta de Cambridge, recibida muy recientemente (el 19 de marzo), del inventor del nuevo telescopio; a saber:

En mi última carta le di motivo para sospechar que el instrumento que le envié estuviera de algún modo averiado, o que los metales estuviesen deslustrados. Y su carta del 16 de marzo me lo confirma plenamente.

Pero mientras yo lo tuve, mostraba algunas partes de la Luna con la nitidez característica de los otros telescopios del mismo aumento. Sé muy bien, sin embargo, que el instrumento tiene imperfecciones en la composición del metal y en su deficiente fundición, como Vd. mismo puede apreciar observando una parte rugosa cercana al centro del metal por el lado pulido, y la forma del metal cerca de esa rugosidad. Y en todas estas cuestiones el instrumento es susceptible de mejora.

Vd. parece insinuar que la proporción de 38 a 1 vale únicamente para aumentar objetos poco distantes. Pero si a tales distancias, digamos unos 500 pies [150 m], magnifica en la citada proporción, entonces, aplicando las reglas de la óptica, a la mayor distancia imaginable debe aumentar en más de $37\frac{3}{4}$ a 1, una disminución tan importante que incluso puede llegar a 38 a 1.

Aquí se ha fabricado otro instrumento parecido al anterior y que funciona muy bien. Ayer lo comparé a un telescopio de seis pies, y descubrí que no sólo aumentaba más sino con más nitidez. Y hoy descubrí que podía leer en un ejemplar de las *Philosophical Transactions*, colocado a la luz del Sol [4010], a unos cien pies [30m] de distancia, y que a una distancia de ciento veinte pies podía distinguir algunas palabras. Cuando hice esta prueba, la abertura (relativa al ojo) equivalía a más de una pulgada y un tercio del espejo objetivo. Esto puede ser de utilidad a los que trabajan en el campo de la reflexión, ya que de esta manera podrán juzgar en buena medida la eficacia de sus instrumentos, etc..

N.B. El mes que viene el lector puede esperar otra carta que llegó demasiado tarde para incluirla aquí. Contiene una tabla, calculada por el mismo Sr. Newton, acerca de las diversas aberturas y propiedades correspondientes a las distintas extensiones de los telescopios.

NOTAS

¹ La fabricación de espejos a partir del pulido de una aleación de bronce era conocida desde la antigüedad. Para construir los suyos, Newton parte de la aleación que se utilizaba para la fabricación de campanas, con la peculiaridad de que modifica la proporción de cobre y estaño, estableciéndola en 3:1, y añade una considerable cantidad de arsénico (un 11%). (Vid. A.A. Mills & P.J. Turvey, «Newton's Telescope: an Examination of the Reflecting Telescope Attributed to Sir Isaac Newton in the Possession of the Royal Society», *Notes and Records of the Royal Society of London*, 33 (2):133-155(1979). En la traducción mantendremos el adjetivo arcaico de «metalino».

² Mills y Turvey suponen que las razones para adoptar este diámetro están relacionadas con la circunstancia de que las matrices que se utilizaban entonces para la fabricación de lentes eran secciones de esferas de 25 pulgadas de diámetro (Mills & Turvey, op. cit., p. 137).

³ Estos aumentos son excesivos en el sentido de que la imagen producida era bastante oscura. Una mayor distancia focal de las lentes hubiera redundado en una mayor nitidez.

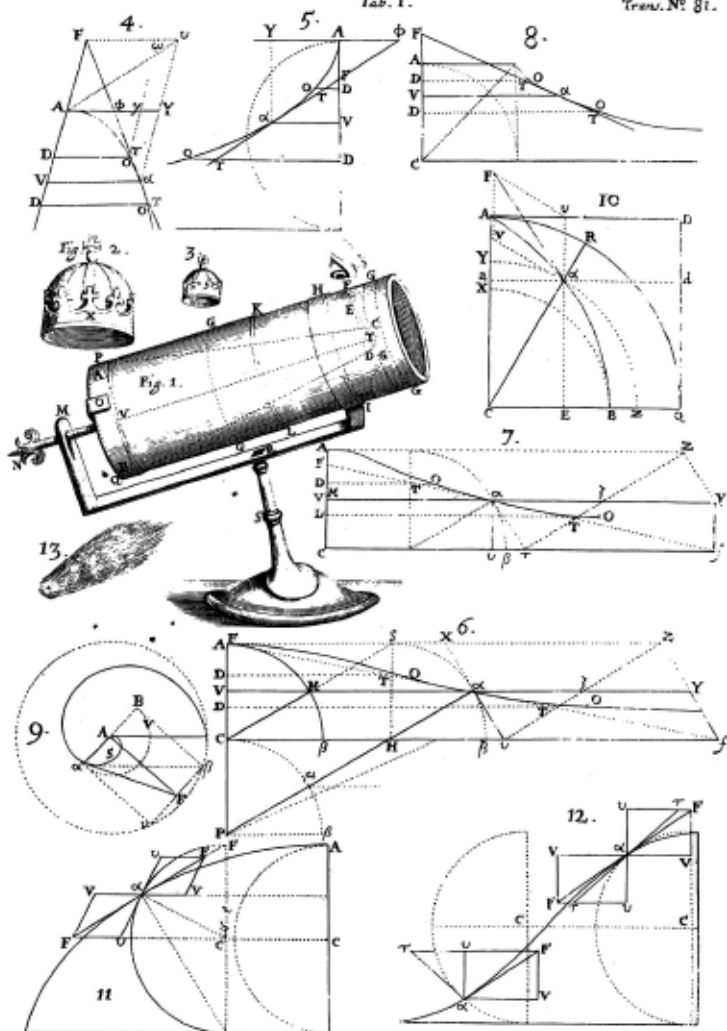
⁴ En los párrafos siguientes se explica la elección del tercer elemento que se le añade a la aleación de cobre y estaño (o «metal campanil»). Este tercer elemento será el responsable, según Newton, del color de la aleación, de su resistencia al pulido y su grado de brillantez. Por ello es importante tener en cuenta su porosidad. A finales del siglo XVIII, sin embargo, se pone en cuestión la necesidad de añadir este tercer elemento, y en vez de introducir un tercer elemento a la aleación de cobre y estaño en proporción 3:1, se opta simplemente por incrementar la cantidad de estaño, fijando la proporción cobre-estaño en 2:1. A pesar de todo, los artesanos continuarán introduciendo pequeñas cantidades de arsénico, aproximadamente un 2% (Mills & Turvey, op. cit., p. 139).

⁵ *Stellate Regulus Mars*, metal de antimonio.

⁶ Se trata del segundo telescopio construido por Newton durante el otoño de 1671, que superaba claramente al primero de 1668. Newton lo envió en diciembre de 1671 a la Royal Society, que cortésmente le había invitado a presentar el nuevo invento al examen de sus miembros. En la reunión del 11 de enero del año siguiente, se informa que el telescopio había sido examinado por el rey Carlos II, el presidente de la Royal Society, Lord Brouncker, además de por Sir Paul Neile, Dr. Christopher Wren, y, por supuesto, Robert Hooke. En esta reunión se decide enviarle a Huygens a París una descripción del instrumento y se nombra a Newton miembro de esta academia. El telescopio permaneció en manos de la Royal Society hasta 1731, cuando se constata su pérdida. En 1766 la firma Heath & Wing, una de las más importantes de fabricación de instrumentos ópticos de la época, reintegra el instrumento a la sociedad. Thomas Heath lo había adquirido unos años antes (posiblemente antes de 1737), y el instrumento —que es el que hoy se conserva en la Royal Society—, había sufrido numerosas manipulaciones. Entre otras, el espejo primario original se pierde, aunque parece haber sido sustituido por uno muy semejante al que debería haber tenido el primer telescopio. Dado que según ciertos testimonios Thomas Heath poseía el primer telescopio de Newton, se ha barajado la hipótesis de que los instrumentistas hayan montado el espejo de este primer telescopio en una reproducción del segundo, incorporando piezas sueltas del telescopio de 1671 y del tercero, construido con Wickins (Mills & Turvey, op. cit., 149, 151-2). Hoy parece admitirse que el tubo, los espejos (repulidos), y parte del pie formaban parte de los originales (Cf., A. Rupert Hall & A. D. C. Simpson, «An Account of the Royal Society's Newton Telescope», *Notes and Records of the Royal Society of London*, 50 (1): 1-11, 1996).

⁷ El amigo en cuestión no es otro que John Wickins, compañero de habitación de Newton en el Trinity College. Wickins transcribía documentos para Newton y le ayudaba en los experimentos. Será el quien, bajo la dirección de Newton, construya el tercero de los telescopios. Wickins se irá distanciando progresivamente de Trinity a partir de 1676, para renunciar a su condición de Fellow en 1683. El telescopio no se fue con él, se quedó con Newton (Hall & Simpson, op. cit., p. 7).

⁸ Como puede verse, sólo los aficionados muy acostumbrados a la mirada astronómica podían distinguir los objetos y orientar correctamente el objetivo.



An Account of a New Catadioptrical Telescope invented by Mr. Newton, Fellow of the R. Society, and Professor of the Mathematics in the University of Cambridge.

THIS Excellent Mathematician having given us, in the Transactions of *February* last, an account of the cause, which induced him to think upon *Reflecting* Telescopes, instead of *Refracting* ones, hath thereupon presented the Curious World with an *Essay* of what may be performed by such Telescopes; by which it is found, that Telescopical Tubes may be considerably shortned without prejudice to their magnifying effect.

This new instrument is composed of two Metallispeculum's, the one Concave, (instead of an Object-glass) the other Plain; and also of a small plano-convex Eye-Glass.

By *Figure I.* of *Tab. I.* the structure of it may be easily imagined; viz. *That* the Tube of this Telescope is open at the end which respects the object; *that* the other end is close, where the said Concave is laid, and *that* near the open end there is a flat oval speculum, made as small as may be, the less to obstruct the entrance of the rays of Light, and inclined towards the upper part of the Tube, where is a little hole furnish't with the said Eye-glass. So that the rays coming from the object, do first fall on the Concave placed at the bottom of the Tube; and are thence reflected toward the other end of it, where they meet with the flat speculum, obliquely posited, by the reflection of which they are directed to the little plano-convex Glass, and so to the Spectators Eye, who looking downwards sees the Object, which the Telescope is turned to.

To understand this more distinctly and fully, the Reader may please to look upon the said *Figure*, in which

AB is the Concave speculum, of which the radius or semi-diameter is $12\frac{1}{2}$ or 13 inches.

CD another metalline speculum, whose surface is flat, and the circumference oval.

GD

GD an Iron wire, holding a ring of brass, in which the *speculum CD* is fixed.

F, a small Eye-glass flat above, and convex below, of the twelfth part of an inch *radius*, if not less; forasmuch as the metal collects the Sun's rays at $6\frac{1}{2}$ inches distance, and the Eye-glass at less than $\frac{1}{2}$ of an inch distance from its vertex: Besides that the Author (as he informs us) knew their dimensions by the tools to which they were ground, and particularly measuring the diameter of the hemi-spherical Concave, in which the Eye-glass was wrought, found it the *sixth* part of an inch.

G G G, the fore-part of the Tube fastn'd to a brass-ring *HI*, to keep it immoveable.

P QKL, the hind-part of the Tube, fastn'd to another brass-ring *PQ*.

O, an Iron hook fastn'd to the Ring *PQ*, and furnish'd with a screw *N*, thereby to advance or draw back the hind-part of the Tube, and so by that means to put the *specula* in their due distance.

M QGI a crooked Iron sustaining the Tube, and fastned by the nail *R* to the Ball and Socket *S*, whereby the Tube may be turned every way.

The Center of the flat *speculum CD*, must be placed in the same point of the Tube's Axe, where falls the perpendicular to this Axe, drawn to the same from the center of the little Eye-glass: which point is here marked at *T*.

And to give the Reader some satisfaction to understand, in what degree it represents things distinct, and free from colours, and to know the aperture by which it admits light: he may compare the distances of the *focus E* from the *vertex's* of the little Eye-glass and the Concave *speculum*, that is, *EE*, $\frac{1}{2}$ of an inch, and *ETV*, $6\frac{1}{2}$ inches: and the *ratio* will be found as 1 to 38; whereby it appears, that the Objects will be magnified about 38 times. To which proportion is very consentaneous, an Observation of the Crown on the weather-cock, about 300 feet distant. For the scheme *X* fig. 2. represents it bigger by 24 times in diameter, when seen through

through this, than through an ordinary Telescope of about 2 foot long. And so supposing this ordinary one to magnifie 13 or 14 times, as by the description it should, this new one by the Experiment must magnifie near as much as hath been assigned.

Thus far as to the structure of this Telescope. Concerning the Metalline matter, fit for these reflecting *Speculums*, the Inventor hath also considered the same, as may be seen by two of his Letters, written to the Publisher from Cambridge Jan. 18. and 29. 1677. to this effect, *viz.*

1. That for a fit metalline substance, he would give this Caution, that whilst men seek for a white, hard and durable metalline composition, they resolve not upon such an one, as is full of small pores, only discoverable by a Microscope. For though such an one may to appearance take a good polish, yet the edges of those small pores will wear away faster in the polishing than the other parts of the metal; and so, however the Metal seem polite, yet it shall not reflect with such an accurate regularity as it ought to do. Thus Tin-glasse mixt with ordinary Bell-metall makes it more white and apt to reflect a greater quantity of light; but withall its fumes, raised in the fusion, like so many aerial bubbles, fill the metall full of those Microscopical pores. But white Arsenick both blanches the Metall and leaves it solid without any such pores, especially if the fusion hath not been too violent. What the *Stellate Regular* of Mars (which I have sometimes used) or other such like substance will do, deserves particular examination.

To this he adds this further intimation, that Putty or other such like powder, with which 'tis polished, by the sharp angles of its particles fretteth the metall, if it be not very fine, and fills it full of such small holes, as he speaketh of. Wherefore care must be taken of that, before judgment be given, whether the metall be throughout the body of it porous or not.

2. He not having tried, as he saith, many proportions of the Arsenick and Metall, does not affirm, which is absolutely best, but thinks, there may conveniently be used
any

any quantity of Arsenick equalling in weight between a fixt and eight part of the Copper, a greater proportion making the Metal brittle.

The way, which he used, was this. He first melted the Copper alone, then put in the Arsenick, which being melted, he stirred them a little together, bewaring in the mean time, not to draw in breath near the pernicious fumes. After this, he put in Tin, and again so soon as that was melted (which was very suddenly) he stirred them well together, and immediately powred them off.

He saith, he knows not, whether by letting them stand longer on the fire after the Tin was melted, a higher degree of fusion would have made the metall porous; but he thought that way he proceeded to be safest.

He adds, that in that metall, which he sent to *London*, there was no Arsenick, but a small proportion of Silver; as he remembers, one shilling in three ounces of metall. But he thought withall, that the Silver did as much harm in making the metall soft, and so less fit to be polish't, as good in rendering it white and luminous.

At another time he mixed Arsenick one ounce, Copper six ounces, and Tin two ounces: And this an Acquaintance of his hath, as he intimates, polish't better, than he did the other.

As to the *objection*, that with this kind of Perspectives, objects are difficultly found, he answers in another letter of his to the Publisher, of Jan. 6. 1672. that that is the inconvenience of all Tubes that magnifie much; and that after a little use the inconvenience will grow less, seeing that himself could readily enough find any day-Objects, by knowing which way they were posited from other objects that he accidentally saw in it; but in the night to find Stars, heacknowledges it to be more troublesome; which yet may, in his opinion, be easily remedied by two sights affixed to the Iron rod, by which the Tube is sustained; or by an ordinary perspective glass fastn'd to the same frame with the Tube, and directed towards the same object, as *Des-Cartes* in his Dioptricks hath described for remedying the same inconvenience of his best Telescopes.

So far the Inventors Letters touching this Instrument : of which having communicated the description to Monsieur *Christian Hugens de Zürichem*, we received from him an Answer to this effect, in his Letter of Febr. 13. 1672. st.n.

I see by the Description, you have sent me of Mr. *Newtons* admirable Telescope, that he hath well considered the advantage, which a *Concave speculum* hath above *Convex glasses* in collecting the parallel rays, which certainly according to the calculation, I have made thereof, is very great. Hence it is, that he can give a far greater aperture to that *speculum*, than to an Object-glass of the same distance of the *focus*, and consequently that he can much more magnifie objects this way, than by an ordinary Telescope. Besides, by it he avoids an inconvenience, which is inseparable from convex Object-Glasses, which is the Obliquity of both their surfaces, which vitiath the refraction of the rays that pass towards the sides of the glass, and does more hurt than men are aware of. Again, by the meer reflection of the metallin *speculum* there are not so many rays lost, as in Glasses, which reflect a considerable quantity by each of their surfaces, and besides intercept many of them by the obscurity of their matter.

Mean time, the main business will be, to find a matter for this *speculum* that will bear so good and even a polish as Glasses, and a way of giving this polish without vitiating the spherical figure. Hitherto I have found no *Specula*, that had near so good a polish as Glass; and if M. *Newton* hath not already found a way to make it better, than ordinarily I apprehend, his Telescopes will not so well distinguish objects, as those with Glasses. But 'tis worth while to search for a remedy to this inconvenience, and I despair not of finding one. I believe, that M. *Newton* hath not been without considering the advantage, which a *Parabolical speculum* would have above a *Spherical* one in this construction; but that he despairs, as well as I do, of working other surfaces than spherical ones with due exactness; though else it be more easie to make a *Parabolical* than *Elliptical* or *Hyperbolical* ones, by reason of a certain propriety of the *Parabolick Conoid*, which
is,

is, that all the Sections parallel to the Axis make the same Parabola,

Thus far M. *Hugenius* his judicious Letter ; to the latter part of which, concerning the grinding *Parabolical Conoids*, Mr. *Newton* saith, in his Letter to the Publisher of Feb. 20. 71. that though he with him despairs of performing that work by Geometrical rules, yet he doubts not but that the thing may in some measure be accomplished by Mechanical devices.

To all which I cannot but subjoyn an Extract of a Letter, received very lately, (March 19th) from the Inventor of this new Telescope, from Cambridge, viz.

IN my last Letter I gave you occasion to suspect, that the Instrument which I sent you, is in some respect or other indisposed, or that the metals are tarnished. And by your Letter of *March 16*. I am fully confirmed in that opinion. For, whilest I had it, it represented the Moon in some parts of it as distinctly, as other Telescopes usually do which magnifie as much as that. Yet I very well know, that that Instrument hath its imperfections both in the composition of the metall, and in its being badly cast, as you may perceive by a scabrous place near the middle of the metall of it on the polished side, and also in the figure of that metall near that scabrous place. And in all those respects that instrument is capable of further improvement.

You seem to intimate, that the proportion of 38 to 1 holds only for its magnifying Objects at small distances. But if for such distances, suppose 500 feet, it magnifie at that rate, by the rules of Opticks it must for the greatest distance imaginable magnifie more than $37\frac{3}{4}$ to 1 ; which is so considerable a diminishing, that it may be even then as 38 to 1.

Here is made another Instrument like the former, which does very well. Yesterday I compared it with a six foot Telescope, and found it not only to magnifie more, but also more distinctly. And to day I found, that I could read in one of the *Philosophical Transactions*, placed in the Sun's
LIII 2 light,

light, at an hundred foot distance, and that at an hundred and twenty foot distance I could discern some of the words. When I made this tryal, its Aperture (defined next the Eye) was equivalent to more than an inch and a third part of the Object-metall. This may be of some use to those that shall endeavour any thing in *Reflexions*; for hereby they will in some measure be enabled to judge of the goodness of their Instruments, &c.

N. B. The Reader may expect in the next Month another Letter, which came somewhat too late to be here inserted; containing a *Table*, calculated by the same Mr. Newton, about the several *Apertures* and *Charges* answering the several *Lengths* of these Telescopes.

E P I T O M E

Binæ Methodi *Tangentium* Doctoris Johannis Wallisii Geom. Prof. Saviliani Oxoniæ; aliàs fusiùs & explicatius ab ipso traditæ, hîc verò ob angustiam loci compendiatæ: In quarum Schematîsmis si forsan literæ quædam redundaverint, illæ ad ea pertinere censendæ sunt, quæ in ampliori ejusdem Scripto continentur, hîc vero dictâ de causa omitantur.

Habes hic (Clarissimè vir) eorum summam (strictim traditam) quæ fusiùs scripseram, meas de Tangentibus Methodos spectantia; duas potissimum quibus præsertim utor; alteram in Speciebus, alteram in Lineis; utramque generali formâ faciliè explicabilem.

Priorem adhibeo Con. Sect. prop. 23, 30, 36, 46, 49. & passim alibi. Quæ hæc est.

Expositâ Curvâ *Aa*, (putâ Parabola, fig. 4.) quam in *a* tangat *aF*, diametro *VDA* occurrens in *F*; ordinatim applicentur *aV*, & *DOT* curvæ in *O* & tangenti in *T* occurrens. Ponatur autem *Va* = *b*, *VA* = *v*, *VF* = *f*, *VD* = *a*, adeoque *DA* = *v* ± *a*, *DF* = *f* ± *a*;

Est (propter similia triangula) $VF.DF :: Va.DT = \frac{f \pm a}{f} b$.

Item, si tangens sit ultra curvam, $DT > DO$; si citra, $DT < DO$: Nempe, $DT = DO$ si intelligatur *D* in *V*; sed, si extra *V*, *DT* vel *DO* major prout tangens est ultra citrave curvam.

Tum,

2005, AÑO INTERNACIONAL DE LA FÍSICA



AYER, 6 DE DICIEMBRE DE 2004 FUE
EL DÍA MÁS CORTO DEL AÑO Y HOY, MAR-
TES, UNO DE LOS MÁS FELICES. ES QUE,
ADEMÁS DE TERMINAR UN LIBRO CON
DOS MEMORIAS DE NEWTON INÉDITAS EN
CASTELLANO, QUEDA UN DÍA MENOS
PARA QUE LLEGUE Y TERMINE LA NAVIDAD

